



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Beitrag zur energetischen und tribologischen Untersuchung von Gesteinsbohrprozessen

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von **Dipl.-Ing. Ulf Kirsten**

geboren am 30. Dezember 1978 in Oelsnitz/Vogtl.

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Reich, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky, Freiberg

Tag der Verleihung: Freiberg, den 22. Oktober 2014

Bibliographische Beschreibung

Kirsten, Ulf

Energetische und tribologische Untersuchung von Gesteinsbohrprozessen

Dissertation 2014; 188 Seiten; 170 Abbildungen; 18 Tabellen; 4 Anlagen

TU Bergakademie Freiberg

Fakultät für Geowissenschaften Geotechnik und Bergbau

Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau

Referat

Mineralischen Rohstoffe werden in vielen Industriezweigen verarbeitet. Hierbei ist der notwendige Energieeinsatz zur Zerkleinerung von Gestein von großer Bedeutung. In dieser Arbeit wurden die Mechanismen der spanenden Gesteinszerstörung sowie grundlegende Ansätze der schlagenden Zerstörung von Hartgestein untersucht. Dazu wurde ein Kleinkaliberbohrversuchsstand entwickelt und genutzt, um unterschiedliche Schneidstoffe im Kontakt mit Festgestein zu beproben. Die Beanspruchung der zum Einsatz kommenden Schneidmaterialien orientiert sich an realen spanenden Gesteinsbohrvorgängen und liefert eine hochaufgelöste Datenbasis für grobspanende Bohrverfahren. Weiterhin fanden Tests an einem Fallwerk statt, die zur Untersuchung dynamischer Belastungen auf Bohrmeißelinserts genutzt wurden. Die Experimente wurden durch Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera begleitet und veranschaulichen die Zerstörungsvorgänge in unterschiedlichen Gesteinen. Die Zerspanbarkeiten der Gesteine wurden hinsichtlich der spezifischen Energie, der Flächenpressungen auf die Schneiden und des Verschleißes der Schneidmaterialien bewertet. Vergleichende Bohrversuche mit einem neuen Schneidstoff wurden durchgeführt. Aus der Arbeit konnten Entwicklungstendenzen für den Einsatz neuer Materialien bei der Hartgesteinszerstörung herausgearbeitet werden. Die Untersuchung der Mechanismen bei der spanenden Zerstörung von Festgestein unter atmosphärischen Bedingungen stellt in Zusammenhang mit den Beurteilungskriterien für die Effizienz des Bohrvorganges eine Basis für die praktische Übertragbarkeit auf Anwendung in der Tiefbohrtechnik dar.

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Prof. Dr.-Ing. Matthias Reich, TU Bergakademie Freiberg, Betreuer
- Christoph Paul Schulze und Peter Schmidt (Projektarbeit 2011 mit dem Thema: „Konstruktion eines Bohrversuchsstandes für die Ermittlung des Verschleißverhaltens von kleinkalibrigen Bohrwerkzeugen“)
- Erik Tondera (Diplomarbeit 2011 mit dem Thema: „Untersuchung der Mechanismen der spanenden Gesteinszerstörung an einem Laborversuchsstand“)
- Michael Schönherr (Diplomarbeit 2011 mit dem Thema: “Investigation of the mechanisms of percussive rock destruction and comparison with experiments on a laboratory test rig“)
- Tomasz Konieczny (Diplomarbeit 2012 mit dem Thema: „Experimentelle Untersuchung der Wirkmechanismen der schlagenden Gesteinszerstörung zur Beschreibung des Bohrens im Hartgestein“)
- Franziska Lehmann, Margarita Mezzetti, Silke Röntzsch, Kirstin Mandel, Anne Schulz, Markus Schubert und Nikolai Jordanow, TU Bergakademie Freiberg, Unterstützung bei Fragen zu Inhalt sowie Grammatik, Rechtschreibung und Layout

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt.

Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mich in irgendeiner Weise bei meiner Tätigkeit im Rahmen des Freiburger Hochdruckforschungszentrums (FHP) am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau unterstützt und somit einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Der gleiche Dank gilt den Initiatoren der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung, die durch ihre großzügige Unterstützung und finanzielle Förderung der praxis- und anwendungsbezogenen Wissenschaften und Forschung an der Bergakademie dieses Projekt erst ermöglicht haben.

Mein besonders herzlicher Dank gilt meinem Betreuer und Gutachter Herrn Professor Dr.-Ing. Matthias Reich, der mir jederzeit mit hilfreichem Rat zur Seite stand sowie mit seiner wertvollen Erfahrung und konstruktiven Kritik die Qualität dieser Arbeit und mich persönlich gefördert hat. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die interessante und abwechslungsreiche Zusammenarbeit in einer sehr angenehmen Atmosphäre danke ich dem gesamten Team des FHP sowie den Mitarbeitern am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau. Für die wertvolle Hilfe bei der Lösung verschiedener technischer Probleme bedanke ich mich bei Angelika Liedke und Andreas Schramm. Ein großes Dankeschön geht an die Arbeitsgruppe Bohrtechnik, Spezialtiefbauausrüstungen und Bergbaumaschinen sowie an Sabine Beyer und Romy Hänsel die für vielfältige Fragestellungen stets ein offenes Ohr hatten. Bei allen ehemaligen und heutigen Mitarbeitern des Institutes und allen hier nicht aufgeführten danke ich für die Unterstützung, freundliche Aufnahme, das positive Arbeitsklima sowie die gute Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft. Weiterer Dank für ihre Unterstützung gebührt den studentischen Hilfskräften, Studienarbeitern und Diplomanden, die einen erheblichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Meine Eltern und Geschwister, die mit Verständnis und Unterstützung zugegen waren, schließe ich in meinen Dank ein. Von Herzen danke ich meiner Frau Claudia und meinem Sohn Theodor, die während dieses Lebensabschnittes viel Liebe und Geduld aufgebracht haben. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung	13
1.1 Einsatzfelder der Gesteinsbohrtechnik	13
1.2 Hintergrund des Forschungsgegenstandes	14
1.3 Aufgabenstellung	15
2 Grundlagen	17
2.1 Systemgrößen bei der Gesteinszerstörung	17
2.2 Gestein	18
2.2.1 Klassifizierung von Gesteinen	18
2.2.2 Lockergestein	19
2.2.3 Festgestein	20
2.3 Gesteinsmechanische Grundlagen	24
2.3.1 Festigkeit und Verformungsverhalten	24
2.3.2 Einfluss von dynamischen Belastungen	30
2.3.3 Eindringfestigkeit	32
2.3.4 Härte	33
2.3.5 Sprödigkeit und Plastizität	34
2.3.6 Abrasivität	35
2.4 Hartstoffe	36
2.4.1 Anwendung und Aufbau	36
2.4.2 Werkzeugstähle und Schnellarbeitsstähle	38
2.4.3 Gegossene Hartlegierungen	39
2.4.4 Hartmetall	39
2.4.5 Schneidkeramik	41
2.4.6 Superharte Werkstoffe	42
2.5 Grundlegendes zu Verschleißvorgängen	44
2.5.1 Tribologie	44
2.5.2 Verschleiß	45

2.5.3	Beschreibung von Verschleißvorgängen	47
3	Bohrprozess und Zerspanung	51
3.1	Einordnung des Bohrens	51
3.2	Die Bohrbarkeit von Festgestein	52
3.2.1	Bewertung von Bohrbarkeiten und Werkzeugverschleiß	52
3.2.2	Maschinentechnische Einflussgrößen auf den Schnittvorgang	55
3.3	Drehende Gesteinsbohrverfahren	56
3.3.1	Spanendes Bohren	56
3.3.2	Rollendes Bohren	60
3.4	Schlagendes Bohren	61
3.5	Drehschlagendes und schlagdrehendes Bohren	66
3.6	Anwendungen in der Gesteinsbohrtechnik	67
3.6.1	Die Bohrwerkzeuge	67
3.7	Verschleißerscheinungen an Gesteinsbohrwerkzeugen	72
3.7.1	Besonderheiten beim Kontakt von Werkzeugen mit dem Gestein	72
3.7.2	Gründe für eine Verschleißanalyse	73
3.7.3	Meißelbeurteilung bei Tiefbohrwerkzeugen	73
3.7.4	Verschleißerscheinungen an PDC Schneidelementen	75
3.7.5	Rückwirkungen vom Gestein auf das Werkzeug	78
4	Eingesetzte Versuchstechnik	80
4.1	Zielstellung der Teststände	80
4.2	Versuchsstand zum spanenden Bohren	80
4.2.1	Anforderungen an den Versuchsstand	80
4.2.2	Komponenten und Messtechnik	81
4.2.3	Werkzeugaufnahme	82
4.2.4	Weiterverarbeitung der Rohdaten	83
4.2.5	Weiterer Ausbau der Versuchsanlage	83
4.3	Versuchsaufbau zur schlagenden Gesteinszerstörung	84
4.3.1	Funktionsweise des Versuchsstandes	84
4.3.2	Auswertemethoden	86
4.4	Fehlerbetrachtung für die Messergebnisse	86
4.4.1	Allgemeines zur Fehlerbetrachtung	86
4.4.2	Messabweichungen am Kleinkaliberbohrversuchsstand	87
4.4.3	Messabweichungen am Fallwerk	87
4.5	Schneidmaterialien für die Versuche	87
4.5.1	Konventionelle Wendeschneidplatten	87
4.5.2	Wendeschneidplatten aus neuen Materialien	88

4.5.3	Schlagbohrköpfe und Inserts aus Rollenbohrwerkzeugen	89
4.6	Verwendete Gesteine	90
4.6.1	Vorbetrachtungen	90
4.6.2	Gesteine für das spangebende Bohren	90
4.6.3	Gesteine für die Fallwerksversuche	91
5	Ergebnisse	93
5.1	Spanende Versuche	93
5.1.1	Bohrungsverläufe mit konventionellen Schneidmaterialien	93
5.1.2	Beschreibung der Ausgangsdaten zur Auswertung	105
5.1.3	Andruckkräfte und Schnitttiefen	105
5.1.4	Spezifische Energien	107
5.1.5	Verschleißverhalten getesteter Materialien	112
5.1.6	Bohrversuche mit neuen Schneidmaterialien	115
5.2	Schlagende Gesteinszerstörung	120
5.2.1	Kräfte und Auftreffgeschwindigkeiten	120
5.2.2	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	123
5.2.3	Eindringenergien	124
6	Werkstoffparameter	129
6.1	Grundlegendes Ziel der Untersuchungen	129
6.2	Anforderungen an Werkstoffe für Anwendungen in der Bohrtechnik	130
6.2.1	Anforderungen aus der Literatur	130
6.2.2	Anforderungen aus drehenden Bohrversuchen und Schlagbeanspruchung	131
6.2.3	Entwicklungsrichtung für den Einsatz von ultraharten Materialien	132
7	Zusammenfassung und Ausblick	133
7.1	Zusammenfassung	133
7.2	Ausblick	136
	Literaturverzeichnis	137
	Tabellenverzeichnis	146
	Abbildungsverzeichnis	147
	Anhang	153

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	mm^2	Fläche
A_M	mm^2	Meißeloberfläche
A_s	mm^2	Spanungsquerschnitt
b	mm	Spanbreite, Schneidenbreite
b_t	mm	Schneidendicke
C	N/mm^2	Kohäsion
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
d	mm	Durchmesser
d_Q	mm	mittlerer Korndurchmesser des Quarzanteils
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
e_{spez}	N/mm^2	spezifische Energie
E_c	J	Schnittenergie
E_α	J	Reibenergie an der Freifläche
E_ϕ	J	Umform- und Scherenergie
E_γ	J	Reibenergie an der Spanfläche
E_{kin}	J	kinetische Energie
E_{kin1}	J	kinetische Energie im Stoßabschnitt 1
E_{kin2}	J	kinetische Energie im Stoßabschnitt 2
E_M	J	kinetische Energie zur Umlenkung des Spanes
E_{pot}	J	potentielle Energie
E_{pot1}	J	potentielle Energie am Ausgangspunkt
E_{pot2}	J	potentielle Energie am Umkehrpunkt
$E_{S,dissipiert}$	J	dissipierte Energie
$E_{S,kin}$	J	kinetische Schlagenergie
E_T	J	Energie zur Bildung neuer Oberflächen
F	N	Kraft
F_A	N	Andruckkraft
F_R	N	Reibkraft
F_S	N	Schnittkraft
f	–	Festigkeitskoeffizient nach PROTODJAKONOV
f_V	N/mm	Verschleißkoeffizient
G	N/mm^2	Schubmodul
h	mm	Schnitttiefe
HV	N/mm^2	Härte nach VICKERS

K	N/mm^2	Kompressionsmodul
K_{Ic}	$MPa\sqrt{m}$	Bruchzähigkeit
k	—	Stoßzahl
k_s	N/mm^2	spezifische Schnittkraft
l	mm	Länge
l_c	mm	Weg entlang des Schnittkraftvektors
M	Nm	Moment
m	kg	Masse
n	$s^{-1}, U/min$	Drehzahl
p	MPa	Druck
p_{proj}	N/mm^2	Flächenpressung
P_c	W	Schnittleistung
Q_c	m^3/s	Zeitspanvolumen
R_Z	μm	Oberflächenrauigkeit
s	m	Weg
t	s	Zeit
T_σ	N/mm^2	Spannungstensor
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
V_Q	—	äquivalenter Quarzanteil
v	m/s	Geschwindigkeit
v_B	m/s	Bohrgeschwindigkeit
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_e	m/s	Wirkgeschwindigkeit
v_f	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
W	g	Verschleiß
W_m	g	massebezogener Verschleiß
$H Ra$	—	Härte nach ROCKWELL

Griechische Symbole

α	$^\circ$	Bruchwinkel
Δ	—	Differenz
ϵ	—	Dehnung
λ_S	—	Schlagwirkungsgrad
γ	$^\circ$	Freiwinkel der Schneiden
ϕ	$^\circ$	Vorschubrichtungswinkel
η	$^\circ$	Winkel zwischen Wirk- und Schnitttrichtungsvektor

μ	—	Reibbeiwert
ν	—	Querdehnzahl
ρ	kg/dm^3	Dichte
σ	N/mm^2	Normalspannung
σ_A	N/mm^2	Oberflächenspannung
σ_d	N/mm^2	Druckspannung
σ_D	N/mm^2	einaxiale Druckfestigkeit
σ_i	N/mm^2	aufgenommene Spannung
σ_r	N/mm^2	reflektierte Spannung
σ_Z	N/mm^2	Zugspannung
τ	N/mm^2	Scherspannung

Indizes

0	ohne äußere Belastung
1	in bzw. um Richtung 1
2	in bzw. um Richtung 2
3	in bzw. um Richtung 3
B	Bohrung
f	Versagensfall
i	Inkrement bzw. Anzahl
$i1$	Inkrement bzw. Anzahl vor dem Stoßvorgang
$i2$	Inkrement bzw. Anzahl nach dem Stoßvorgang
j	Inkrement bzw. Anzahl
$j1$	Inkrement bzw. Anzahl vor dem Stoßvorgang
$j2$	Inkrement bzw. Anzahl nach dem Stoßvorgang
N	normal
P	Ausbreitungsrichtung longitudinal
R	Ausbreitungsrichtung nach RAYLEIGH
S	Ausbreitungsrichtung transversal
s	in Schnittrichtung
T	tangential
v	in Vorschubrichtung
x	Orientierung in x-Richtung
xy	Orientierung in y-Richtung auf Basis der Fläche x
xz	Orientierung in y-Richtung auf Basis der Fläche x
y	Orientierung in y-Richtung
yx	Orientierung in x-Richtung auf Basis der Fläche y

yz	Orientierung in z-Richtung auf Basis der Fläche y
z	Orientierung in z-Richtung
zx	Orientierung in x-Richtung auf Basis der Fläche z
zy	Orientierung in y-Richtung auf Basis der Fläche z
max	Maximum
min	Minimum

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
API	American Petroleum Institute
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
CAI	Cerchar Abrasivitäts Index
CAD	computer aided design
CBN	kubisches Bornitrid
CVD	chemical vapour deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäischen Normen
FAST	Field Assisted Sintering Technique
ISO	International Organization for Standardization
FHP	Freiberg High-Pressure Research Centre
HS	Schnellarbeitsstähle
near-nano WC-Co	near-nanokristalline Wolframcarbid-Cobalt-Hartstoffe
RAI	Rock Abrasivity Index
ROC	Rapid Omnidirectional Compaction
P	Versagenspunkt
PCD	polycrystalline diamond
PDC	polycrystalline diamond compact
PKD	polykristalliner Diamant
S.	Seite
s.	siehe
SM	Schildmaschine
SPS	Spark Plasma Sintering
Tab.	Tabelle
TBM	Tunnelbohrmaschine
TiCN/TiN	Titancarbonitrid/Titannitrid
TSP	thermally stable polycrystalline diamond
TVD	True vertical depth
Vgl.	Vergleich
vgl.	vergleiche
WC	Wolframcarbid

1 Einleitung

1.1 Einsatzfelder der Gesteinsbohrtechnik

Seit Jahrtausenden bearbeitet der Mensch Gestein mit unterschiedlichsten Hintergründen. Anfangs wurde es als Werkzeug genutzt, später Behausungen und Grabstätten daraus errichtet. Weiterhin standen Gesteinsmassive schon vor 5.000 Jahren dem Menschen beim Bau von Wasserversorgungen im Weg. Folgend entstanden tiefste Brunnen mit, aus heutiger Sicht, primitivsten Werkzeugen. In der Neuzeit trug vor allem der stetig wachsende Hunger nach Energie und Rohstoffen dazu bei, dass Abbau- und Vortriebsmethoden entwickelt wurden, die ungeahnte Materialströme bewegen.

Einen nicht unerheblichen Teil umfasst hierbei das Feld der allgemeinen Gesteinsbohrtechnik. Deren geotechnische Anwendungsfelder liegen vor allem in der Erschließung von Rohstoffen oder der Erstellung neuer Verkehrswege. Dabei können die zu erbohrenden Medien sowie die geometrischen Parameter der Bohrungen stark variieren. Die Anwendungspalette reicht von Sprenglöchern im Tagebau über kilometerlange Bohrungen nach Kohlenwasserstoffen bis hin zu Tunnelbauwerken mit großen Ausbruchsquerschnitten. Die zu erfüllenden Aufgaben sind bei allen Bohrungen gleich. Das zu durchörternde Medium muss zerstört, das Bohrklein ausgetragen und das entstehende Bohrloch gesichert werden. Dabei sollte der technisch günstigste Verfahrensweg gewählt werden, um die eingesetzte Energie effizient zu nutzen. Dies hat Einfluss auf die Auswahl der Art der Gesteinszerstörung, des Bohrkleinabtransportes, der Separierung und dem kostengünstigen Ausbau des Bohrloches. Tangierende Einsatzfelder sind im Bereich des Spezialtiefbaus sowie der kontinentalen als auch submarinen Rohstoffgewinnung zu sehen.

Das Lösen bzw. die Zerkleinerung von mineralischen Rohstoffen erlangt auch bei ihrer weiteren Verarbeitung große Bedeutung. In diesen Anwendungsfeldern wird meist auf geometrisch unbestimmte Schneiden zurückgegriffen. Dies schließt z. B. auch Techniken zum Anlagen schonenden Transport sowie die Aufbereitung der Rohstoffe mit ein. Der Grund für die Verwendung geometrisch unbestimmter Schneiden liegt in den wechselnden Eigenschaften der Minerale. Da Gestein meist inhomogen aufgebaut ist,

eignen sich feinspannende Schneidverfahren, um auch mit nicht vorhersehbaren Materialeigenschaften fertig zu werden. Dennoch wurden Arbeiten mit geometrisch bestimmten Schneiden voran getrieben. Die Vorteile, wie z. B. eine günstigere Energiebilanz, ein definierter Schneidspalt sowie höhere Schnittgeschwindigkeiten, führen zu einer Ausbreitung dieser Verfahren.

Im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Beanspruchungsarten sind ebenso die Gesteinseigenschaften mit einzubeziehen. Des Weiteren richtet sich die Effektivität der Prozesse nach der sinnvollen Beanspruchungsrichtung und dem damit verbundenen Verschleiß an den Bohrwerkzeugen.

1.2 Hintergrund des Forschungsgegenstandes

Die Erkundung und Nutzung von Ressourcen und die Entwicklung neuer Energiekonzepte treiben die Tiefbohrtechnik in immer größere Tiefen voran [96]. Mit wachsender Teufe (bergmännische Bezeichnung für Tiefe) einer Tiefbohrung nehmen die Kosten überproportional zu. Als Grund hierfür sind die scheinbar wachsende Gesteinsfestigkeit und somit die abnehmende Bohrgeschwindigkeit aufzuführen. Des Weiteren müssen bei einem Wechsel der Schneidwerkzeuge längere Unterbrechungen zum Aus- und Einbau des Bohrgestänges einkalkuliert werden. Somit werden an moderne Bohrgarnituren in Bezug auf Langlebigkeit und Verschleißfestigkeit höchste Anforderungen gestellt. Das neue Anwendungsfeld der tiefen Geothermie erfordert Bohrungen im kristallinen Festgestein auf die existierenden Bohrmeißel der Öl- und Gasbohrtechnik nicht optimal abgestimmt sind. Die Entwicklung und Nutzung spezieller ultraharter und verschleißfester Werkstoffe bietet das Potenzial für signifikante Kosteneinsparungen. Durch Einbettung dieser Materialien in einen effizienten Bohrprozess sind Steigerungen der Bohrgeschwindigkeit sowie eine Verlängerung der Standzeiten von Bohrgarnituren realisierbar. Durch eine gezielte Charakterisierung von Schneidvorgängen bei der Hartgesteinszerstörung und Überprüfung vorhandener Verschleißerscheinungen sowie einer Analyse der Gesteinszerstörungsmechanismen können Rückschlüsse auf einen effektiveren Bohrprozess gezogen werden. Die Entwicklung und Nutzung spezieller Zerstörungsmechanismen für Hartgesteine in Kombination mit dem Einsatz ultraharter und verschleißfester Werkstoffe könnte einen entscheidenden Meilenstein bei der Eroberung der Tiefe darstellen.

Im Rahmen des Freiburger Hochdruck-Forschungs-Zentrums (FHP) wird an der Entwicklung neuer ultraharter Materialien für verschiedenste Anwendungsgebiete gearbeitet. Das Forschungsgebiet erstreckt sich über acht Teilprojekte von der theoretischen Vorhersage über die Synthese und Charakterisierung von Materialien bis hin zu theore-

tischen Simulationen und praktischen Anwendungen in Versuchswerkzeugen. Durch die enge Zusammenarbeit mit vielen kleinen und mittelständischen Betrieben im Einzugsgebiet der TU Bergakademie Freiberg findet eine Förderung der einheimischen Wirtschaft statt. Auch die Zusammenarbeit mit anderen Universitäten stärkt nachhaltig den Forschungs- und somit den Wirtschaftsstandort Sachsen. Die Förderung des FHP stammt aus der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung. Diese wurde von Dr. Peter Krüger 2006 der TU Bergakademie Freiberg gestiftet und wird durch Frau Erika Krüger als Vorsitzende fortgesetzt. Aus den Erträgen der Stiftung stehen der Freiburger Universität jährlich zusätzliche Mittel zur Verfügung. Die anwendungsorientierte Forschung wurde vor allem im Teilprojekt 5 mit dem Titel „Entwicklung und Praxistest neuer Bohrwerkzeuge basierend auf ultraharten Werkstoffen“ vorangetrieben. Die Forschungsschwerpunkte wurden unter anderem auf folgende Teilgebiete eingegrenzt:

- Detaillierte Analyse der Belastungsprozesse an Bohrwerkzeug und Gestein
- Ziehen von Rückschlüssen für einen effektiveren Bohrprozess im Hartgestein
- Entwicklung fertigungstechnischer Methoden zum Einsatz der neuen ultraharten Materialien am Bohrwerkzeug
- Erkenntnisumsetzung beim Entwurf von Prototyp-Werkzeugen

Eine besondere Herausforderung stellt die bisher nur ungenügend gelungene Realisierung von Werkstoff- und Vortriebskonzepten für das Tiefbohren in Hartgestein dar. Während Erdöl zumeist in leicht zu bohrenden Sandsteinschichten und nur an vergleichsweise wenigen Standorten vorkommt, steckt in vielen Regionen Deutschlands und der Welt mit der Erdwärme noch ein gewaltiges energetisches Potenzial in Tiefengesteinen wie Granit und Gneis. Durch verbesserte Werkstoffe und Verfahren könnten Tiefbohrungen für Geothermie auch für lokale Träger wie Gemeinden, Landkreise und mittelgroße Unternehmen eine gangbare Alternative zur Energiegewinnung aus fossilen Trägern werden. Die im Fokus stehenden Materialien und Bedingungen sollen bewusst dem Technik- und Geobereich entsprechen.

1.3 Aufgabenstellung

Als Ziel steht die Entwicklung und Nutzung spezieller Gesteinszerstörungsmechanismen für Hartgesteine in Kombination mit dem Einsatz ultraharter, verschleißfester Werkstoffe. Hierfür soll im Rahmen dieser Arbeit eine grundlegende Betrachtungen der Zerstörungsmechanismen von Gestein sowie die Darstellung der in der Praxis zum Einsatz kommenden Schneidstoffe zu vorgenommen werden. Der Schwerpunkt der Arbeit soll bewusst im Gebiet der Tiefbohrtechnik angesiedelt sein. Eine Verifizierung der

Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit der in den übrigen Teilprojekten entwickelten Werkstoffe soll durch Tests und Analysen nachgewiesen werden.

Es ist ein Versuchsstand zu entwickeln, der in Lage ist, die Werkstoffproben als Schneidmaterialien in Kontakt mit Gestein zu bringen. Die Beanspruchung soll sich möglichst an einem realen Gesteinsbohrvorgang orientieren. Dafür ist in Bezug auf die Bereitstellung der Probematerialien eine sinnvolle Größe des Versuchsstandes zu wählen.

Ausgehend von oben stehenden Aussagen besteht die Idee der vorliegenden Arbeit darin, die vollständige Auswertung der Effektivität des Bohrvorganges anhand von systematischen Beobachtungen und eine Ermittlung aller Arbeitsgrößen des Schneidprozesses während der Bohrversuche vorzunehmen. Zu diesem Zweck sind konventionelle Schneidstoffe als Referenzmaterialien zu verwenden. Das Ziel in der Arbeit ist eine Bewertung der Effektivität von spanenden Bohrvorgängen aus den Gesteinskennwerten in Zusammenhang mit der Quantifizierung der Belastungen an den geometrisch definierten Schneiden. Folgend soll ein Vergleich des Verschleißes von konventionellen und neuartigen Werkstoffen vorgenommen werden. Um Entwicklungsrichtungen für neue Schneidstoffe aufzuzeigen, sind Korrelationen und Tendenzen aus den ermittelten Messwerten abzuleiten und in Verbindung mit den verwendeten Gesteinen zu bringen.

2 Grundlagen

2.1 Systemgrößen bei der Gesteinszerstörung

Der Prozess der Gesteinszerstörung ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig und noch immer schwer vorausszusagen [45]. Die unterschiedlichen Ansätze zur Beschreibung grenzen den Zerstörungsprozesses meist in Teilgebiete ein. Im Wesentlichen können die Abhängigkeiten des Bohrprozesses wie in Abb. 2.1 beschrieben werden.

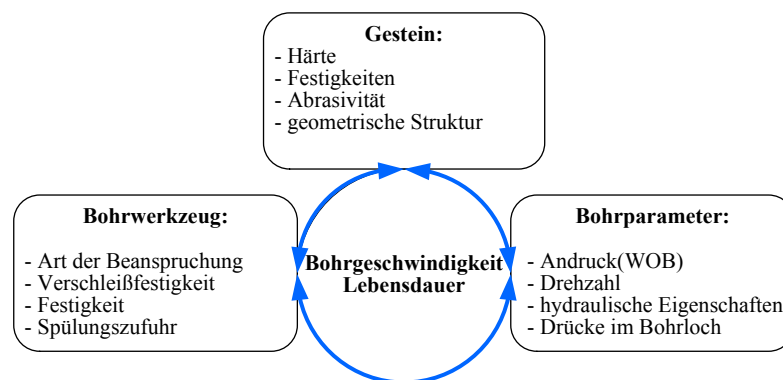


Abb. 2.1: System der Gesteinslösung nach BELOHLAVEK [14]

Bei der Vorhersage der zu erwartenden Bohrmeter oder des Werkzeugverschleißes wird meist nur ein Teilgebiet bewertet. Um eine Aussage über die Wechselwirkungen von Gestein, Bohrwerkzeug und den Bohrparametern zu treffen, ist eine ganzheitliche Betrachtung von Nöten. Die Angabe der beeinflussenden Faktoren für eine Beschreibung des Bohrvorganges variiert mit der Systemgrenze, die bei der Bewertung gesetzt wird. Als Vorschlag können die zusammengetragenen Einflussgrößen nach FISCHÖTTER [39] aufgenommen werden. Diese sind in Meißel-, Spülungs- und Maschinenkennzeichen sowie in Kennzeichen des Gesteins unterteilt.

2.2 Gestein

2.2.1 Klassifizierung von Gesteinen

Da die geologischen Modelle Abweichungen zu den real vorhandenen Gegebenheiten aufweisen, ist nach REICH [78] das anstehende Gestein als wohl wichtigster Einflussfaktor auf den Bohrprozess zu nennen. Die Gesteine werden in Fest- und Lockergesteine eingeteilt. Um Gesteine zu klassifizieren gibt es verschiedene Methoden. Zum einen können Bestimmungen im makro- und mikroskopischen Bereich vor Ort oder im Labor durchgeführt werden [63]. Auch die Ermittlung der Gefügebestandteile auf chemischem Weg ist möglich. Im Allgemeinen können Böden nach der Art der Gewinnbarkeit, DIN 18300 [24] klassifiziert werden. Diese Bodenklassen reichen von 1 bis 7. Dabei repräsentiert Bodenklasse 1 einen leicht und Klasse 7 einen schwer gewinnbaren Boden, Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Einstufung in Boden und Felsklassen nach DIN 18300 [24]

Bodenklasse	Merkmale	Zuordnung
1	Oberboden	Humus, Oberste Schicht des Bodens (Mutterboden)
2	Fließende Bodenarten	Boden mit relativ hohem Wassergehalt (flüssig bis zähflüssig)
3	Leicht lösbare Böden	Sand- und Kiesboden mit geringem Steinanteil (Anteil < 30 % über einem Durchmesser von 63 mm Korngröße)
4	Mittelschwer lösbare Böden	Leichte bis mittlere Plastizität, ineinander gebunden, mit geringem Steinanteil (Anteil < 30 % über einem Durchmesser von 63 mm Korngröße)
5	Schwer lösbare Böden	Böden der Bodenklasse 3 und 4 mit einem großen Steinanteil (Anteil > 30 % über einem Durchmesser von 63 mm Korngröße)
6	Leicht lösbarer Fels und ähnliche Bodenarten	Felsiger Boden, jedoch brüchig, zerklüftet, weich oder verwittert sowie ähnlich ineinander verfestigte Bodenarten
7	Schwer lösbarer Fels	Felsiger Boden mit einem festem Gefüge, wenig zerklüftet, brüchig oder verwittert

Die physikalische und chemische Beschreibung des zu lösenden Bodens wird für ingenieurtechnische und mineralogische Anwendungen in Normen geregelt, z. B. DIN EN ISO 14668-1/2, 14689-1 [33, 34, 35]. Hierbei werden die Grundprinzipien für die Benennung von Böden aufgrund ihrer Eigenschaften dargestellt. Dabei findet eine Bewertung der geologischen Struktur, der Trennflächen, der Bestandteile sowie der Korngrößen statt. Des Weiteren werden auch die Kornfraktionen und die Plastizität des Bodens unterschieden. Die Beschreibung von Fels erfolgt mit Hilfe von Bohrkernen und Proben oder direkt am frei zugänglichen Gestein. Dabei wird auf die mineralogische Zusammensetzung, genetische Aspekte und Korngrößen sowie die Lagerung eingegangen. Die

Benennung und äußerliche Beschreibung sowie der Verwitterungszustand werden ebenfalls berücksichtigt. Die einaxiale Druckfestigkeit und die Anordnung von Klüften sowie Trennflächen als auch die Wasserdurchlässigkeit können nach vorgegebenen Schemata bewertet werden. Eine weitere Klassifizierung kann nach DIN 18312 [25] vorgenommen werden. In dieser werden die Maßnahmen für den Ausbruch und die Sicherung des entstehenden Hohlraums eingeteilt. Dieser Betrachtung liegen Untersuchungen zur Standfestigkeit des aufgefahrenen Hohlraumes nach LAUFFER [54] und BIENIAWSKI [18] zu Grunde. Dabei finden die Form und Größe des Hohlraumquerschnitts sowie das eingesetzte Bauverfahren Berücksichtigung. Allgemein werden die folgenden Vortriebsklassen unterscheiden, Tab. 2.2:

Tab. 2.2: Einteilung der Vortriebsklassen nach DIN 18312 [25]

Vortriebsklasse	Maßnahmen
1	Ausbruch ohne Sicherung.
2	Ausbruch mit Sicherung, die in Abstimmung mit dem Bauverfahren so eingebaut werden kann, dass Lösen und Laden nicht behindert werden.
3	Ausbruch mit in geringem Abstand zur Ortsbrust (bei Vertikalschächten: Schachthohle bzw. -firste) folgender Sicherung, für deren Einbau das Lösen und Laden unterbrochen werden müssen.
4	Ausbruch mit unmittelbar folgender Sicherung.
4 A	Ausbruch nach Vortriebsklasse 4 mit Unterteilung des Ausbruchquerschnitts aus Gründen der Standsicherheit.
5	Ausbruch mit unmittelbar folgender Sicherung einschließlich Sicherung der Ortsbrust.
5 A	Ausbruch nach Vortriebsklasse 5 mit Unterteilung des Ausbruchquerschnitts aus Gründen der Standsicherheit.
6	Ausbruch mit unmittelbar folgender und voreilender Sicherung.
6 A	Ausbruch nach Vortriebsklasse 6 mit Unterteilung des Ausbruchquerschnitts aus Gründen der Standsicherheit.
7	Ausbruch mit unmittelbar folgender Sicherung einschließlich Sicherung der Ortsbrust und voreilender Sicherung.
7 A	Ausbruch nach Vortriebsklasse 7 mit Unterteilung des Ausbruchquerschnitts aus Gründen der Standsicherheit.

Das Bauverfahren wird beim Herstellen großer untertägiger Bauten berücksichtigt. Sollte z. B. eine Tunnelbohrmaschine (TBM) genutzt werden, kommen die Vortriebsklassen TBM 1 - 5 zum tragen. Bei Verwendung einer Schildmaschine (SM), reduzieren sich die Klassen auf SM 1 bis 3, wobei eins für „ohne Stützung“ und drei für eine „voll gestützte Ortsbrust“ verwendet wird. Beim Auffahren von Tiefbohrungen fallen diese Einteilung nicht so stark ins Gewicht, da der entstandene Hohlraum aufgrund seiner Geometrie, dem Einsatz einer stützenden Spülung und des umgebenden Gesteins als weitestgehend stabil anzusehen ist.

2.2.2 Lockergestein

Lockergesteine stellen eine Mischung von Mineralien, Gesteinsbruchstücken und organischem Material sowie Wasser und Luft dar. Sie besitzen keine mineralische Bindung innerhalb des Haufwerks und können in bindige (Ton, Lehm, tonige Schluffe usw.)

und nichtbindige (Kiese, Sande, Schluffe usw.) unterteilt werden. Bei nichtbindigen wird der Zusammenhalt nur durch die innere Reibung aufgebracht. Die Eigenschaften von Lockergesteinen werden zu einem maßgeblichen Anteil von ihrem Wassergehalt bestimmt. Teilchenhaftung durch Kohäsion werden durch Tonminerale verursacht und sind typisch für bindige Lockergesteine. Ein ähnlicher Effekt kann durch organische Bestandteile erreicht werden. Durch die sehr geringe Scherfestigkeit lassen sich Aussagen über die Stabilität relativ gut mit dem Reibungswinkel beschreiben. Als eine in der Praxis wichtige Information ist die Sieblinie zu sehen. Sie gibt Auskunft über die Kornverteilung und über die Verdichtbarkeit des Bodens. Als maßgebende Werte sind hierbei die Ungleichförmigkeitszahl und die Krümmung der Sieblinie zu nennen [42]. Allgemein können Lockergesteine in die Gewinnbarkeitsklassen 1 - 5 eingeteilt werden [24]. Bei Lockergesteinen stellt nicht das Lösen aus dem Verband die Herausforderung dar, sondern meist der Abtransport des gewonnenen Materials. Bei Erhöhung von Druck und Temperatur oder durch Bergwasser werden in die Zwischenräume von Lockergesteinen im Laufe der Zeit Abscheidungen eingetragen, die diese verkleinern oder auszementieren. Dabei kann es sich um Kalzit und Kieselsäure, Ton und Eisenoxide handeln. Somit können aus lockeren Materialien ein Festgesteine, wie Kalksandstein oder Konglomerate, entstehen. Dieser als Diagenese beschriebene Prozess setzt sich aus Kompaktion und Zementation zusammen.

2.2.3 Festgestein

Als Festgestein wird eine Gemenge von Mineralien und Gesteinsbruchstücken bezeichnet. Im Gegensatz zum Lockergestein besteht ein fester Verband der einzelnen Bestandteile. Zwischen den Mineralkörnern befinden sich unmittelbare oder mittelbare Kornbindungen, die auch die Eigenschaften bedingen. Die Beschreibung der Eigenschaften, die Untersuchungsverfahren und die Beurteilung kann nach DIN EN ISO 14689 [35] erfolgen. Für die Bestimmung der unterschiedlichen Festigkeiten und der Härte können verschiedenste Verfahren genutzt werden (vergl. Abb. 2.4). Festgestein kann als inhomogen und anisotrop beschrieben werden. Eine Beeinflussung geschieht meist durch hohe Spannungen und Temperaturen. Zu den Festgesteinen zählen die drei Gesteinsarten Magmatite (Plutonite, Vulkanite, Ganggesteine), Metamorphite (Umwandlungsgesteine) und Sedimentite (Ablagerungsgesteine) [63]. Weitere Einflussfaktoren, die sich auf die Eigenschaften des Festgesteins auswirken, sind die Anzahl, Verteilung, Ausbildung und Richtung der Trennflächen (Klüfte) mit ihren Bestandteilen und ihrem Wassergehalt. Die Festigkeiten der Trennflächen sind geringer als die Substanzfestigkeit der Klufkörper. Um die wechselnden Eigenschaften zu berücksichtigen, wird immer nur ein definierter Bereich, der sogenannte Homogenbereich, betrachtet. Die geologischen Homogenbereiche werden durch festgelegte Eigenschaften, wie Richtungsgefüge der

Trennflächen, lithologische Abfolge oder gleicher Verwitterungszustand, abgegrenzt. Des Weiteren können Belastungsversuche technisch relevante Ergebnisse liefern. Als Ergebnisse solcher Untersuchungen liegen Benennungen nach den Normenwerken vor (DIN 18196, 18300, 18123, DIN EN ISO 14689 [23, 24, 25, 35]), siehe Abb. 2.2.

GESTEINS-GRUPPE NACH IHRER ENTSTEHUNG	MAGMATISCHES GESTEIN				SEDIMENTGESTEIN		METAMORPHES GESTEIN	GESTEINS-GRUPPE NACH IHRER ENTSTEHUNG													
	PYROKLAS-TISCH*)	MAGMATISCH			KLASTISCH	CHEMISCH/ORGANISCH															
Struktur	MASSIG				GESCHICHTET			GESCHIE-FERT	Struktur												
Zusammen- setzung	Mindestens 50 % der Körner beste- hen aus magmat- ischem Gestein	Quarz, Feldspäte, Glimmer, dunkle Minerale	Feldspäte, dunkle Minerale	Dunkle Minerale	Gesteinskörner, Quarz, Feldspäte und Tonmineralien	Mindestens 50 % der Körner beste- hen aus Karbo- naten	Salze, Karbonate, quarzhaltig, kohlenhaltig	Quarz, Feldspäte, Glimmer, dunkle Minerale, Karbonate	Zusammensetzung												
		sauer	intermediär	basisch						ultrabasisch											
		sehr grob- körnig	gerundete Körner: AGGLOMERAT	PEGMATIT						Körner sind Gesteinsbruchstücke	Ruditisch	TEKTONISCHE BREKZIE	sehr grob- körnig								
				eckige Körner: VULKANISCHE BREKZIE										GRANIT	DIORIT	GABBRO	PYROXENIT PERIDO- TIT	KALK- RUDIT	HALIT ANHYDRIT GIPS	HORNFELS MARMOR GRANULIT	2
0,002	fein- körnig	feinkörniger TUFF	RHYOLIT	ANDESIT	BASALT	SCHLUFF- TONSTEIN	SCHLUFFSTEIN >50 % feinkörnige Partikel	MERGELSTEIN	feinkörnig	0,002											
sehr fein- körnig	Sehr feinkörniger TUFF	VULKANISCHES GLAS				Lutitisch	KALK- LUTIT	quarzhaltig FEUERSTEIN kohlehaltig LIGNIT KOHLE	MYLONIT	sehr fein- körnig	0,002										
		glasig										KALK- LUTIT	quarzhaltig FEUERSTEIN kohlehaltig LIGNIT KOHLE	MYLONIT	sehr fein- körnig	0,002					
		amorph															KALK- LUTIT	quarzhaltig FEUERSTEIN kohlehaltig LIGNIT KOHLE	MYLONIT	sehr fein- körnig	0,002
Vorherrschende Korngröße (mm)																					

*) Pyroklastische Gesteine werden oft als Sedimentgesteine eingeordnet

Abb. 2.2: Beschreibung von Fels für bautechnische Zwecke nach DIN EN ISO 14689 [35]

Die geologische Bestimmung der felsbildenden Mineralien auf makroskopischer Ebene kann vor Ort durch die Farben der Minerale, die Ritzbarkeit und deren Reaktion auf Säuren, z. B. HCl, erfolgen. Die Ritzbarkeit als Klassifizierung der Gesteinshärte nach MOHS ist ein wichtiges Merkmal für eine Einteilung, Abb. 2.3.

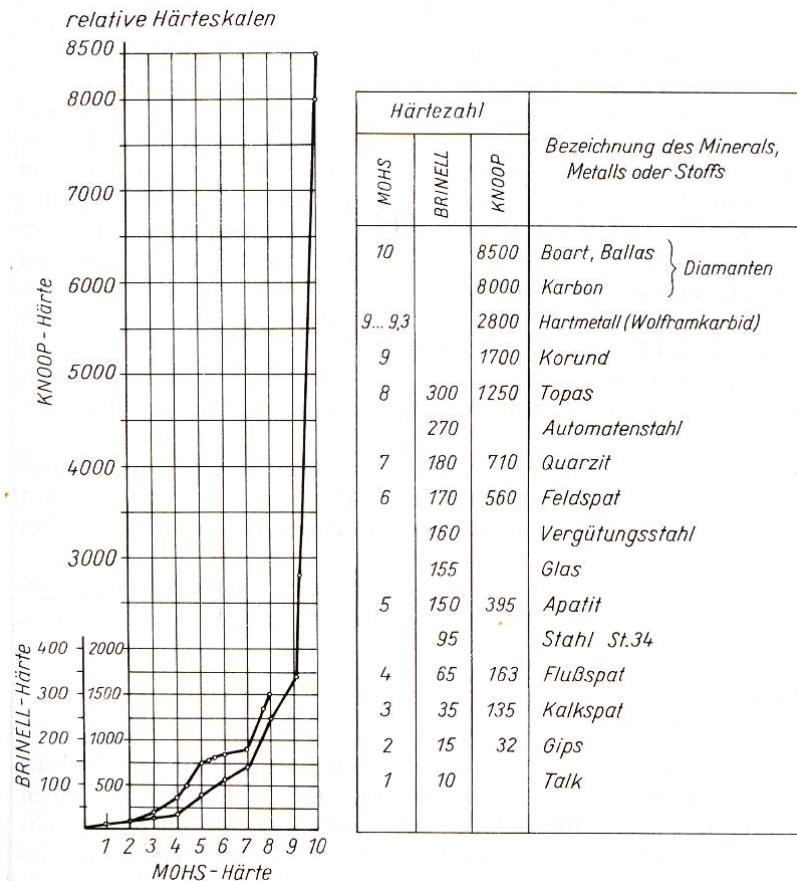


Abb. 2.3: Vergleichbarkeit von Härteskalen nach ARNOLD [9]

Wie in den Arbeiten von BELOHLAVEK, LUY und NICKEL [14, 58, 67] bewiesen, hat die Flüssigkeitsphase in den Porenräumen des Gesteins einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf deren Gewinnbarkeit. Festgestein gilt im allgemeinen als Festkörper mit mechanischer Widerstandsfähigkeit und klarer Struktur sowie Verformbarkeit. Diese ingenieurtechnisch relevanten Eigenschaften von Festgesteinen lassen sich auf verschiedenste Parameter anwenden. Die Festigkeiten (Druckfestigkeit, Scherfestigkeit, Zugfestigkeit) lassen Rückschlüsse auf den Zusammenhalt zu. Härte und Abriebfestigkeit sowie Abrasivität (äquivalenter Quarzgehalt) können wiederum als direkte Parameter für Verschleißbetrachtungen dienen. Weitere den Löseprozess beeinflussende Eigenschaften sind Sprödigkeit, Plastizität, Porosität und Permeabilität des zu zerstörenden Festgesteines. Die Prüfung der Festigkeiten kann durch die in Abb. 2.4 dargestellten Methoden vollzogen werden.

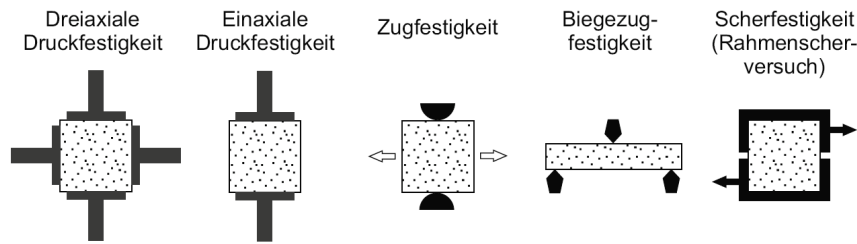


Abb. 2.4: Prüfmethoden von Festgestein nach SEBASTIAN [88]

2.3 Gesteinsmechanische Grundlagen

2.3.1 Festigkeit und Verformungsverhalten

Festigkeiten

Die Festigkeit bezeichnet die Widerstandsfähigkeit eines Stoffes gegenüber Verformung und Trennung. Um mit einem Werkzeug Gestein zu zerstören, muss dessen Festigkeit (Zug-, Druck- od. Scherfestigkeit) überwunden werden. Um ein Gestein möglichst umfangreich zu charakterisieren, werden Probekörper nicht nur auf Druck sondern auch auf Zug, Scherung sowie in Triaxialtests beansprucht. Ziel ist ein definiertes Abbild des Gesteinsverhaltens unter Belastung für die Auslegung der Werkzeuge, die zu dessen Zerstörung eingesetzt werden sollen. Als wichtigste geotechnische Basis für die Beurteilung von Gesteinen dient die einaxiale Druckfestigkeit, die abhängig ist von den am Gesteinsaufbau beteiligten Mineralen, dem Mikrogefüge sowie der Kornbindung. Die Wahl von Bohrverfahren und Werkzeugen richtet sich maßgeblich nach der Druckfestigkeit des Gesteins, da nach AADNOY [7] bei den meisten Bohrverfahren die Gesteine hauptsächlich durch eine aufgebrachte Druckbelastung zum Versagen gebracht werden. Bei Betrachtung eines Gesteinselementes, welches in einem homogenen Gesteinskörper eingebettet ist, kann von einer behinderten Seitendehnung ausgegangen werden. Dieser Fall wird im Labor durch Triaxialversuche ermittelt und hat, je nach Versuchstyp, höhere Druckfestigkeitswerte als die uniaxialen Tests zur Folge [9]. Im dreiachsigen Spannungszustand richtet sich der Betrag der Druckfestigkeit nach den umgebenden Spannungen, welche auf das Volumenelement wirken. Beim Einsatz spanender Verfahren wird das Gestein auf Scherung beansprucht. Die Scherfestigkeit von Festgestein befindet sich im Allgemeinen in der Größenordnung von 20 bis 25 % der einaxialen Druckfestigkeit. Unter der äußeren Belastung wird eine Schubspannung erzeugt, die Verschiebungen an einer oder mehreren Bruchflächen zur Folge hat. Da die Scherfestigkeit von Gestein geringer als die Druckfestigkeit ist, erfordert die Gesteinszerstörung auch weniger Energieeinsatz von Seiten des Bohrwerkzeugs. Eine noch effektivere Methode Gestein zu zerstören, ist die Beanspruchung auf Zug. Die zu überwindende

Zugfestigkeit bei Gestein liegt gewöhnlich bei etwa 10 bis 15 % der einaxialen Druckfestigkeit und kann als Bindung der Körner im Gestein angesehen werden. Ein Verfahren, welches sich dies zu Nutze macht, wurde bereits bei Tunnelvortrieben am Uetlibergtunnel (Schweiz) eingesetzt, ist jedoch mit einem erhöhten maschinellen Aufwand verbunden [83]. Im allgemeinen Bohrprozess der Tiefbohrtechnik werden Gesteine nicht direkt auf Zug beansprucht.

Verformungsverhalten

Die wirkenden Spannungen im Gestein sind direkt mit den resultierenden Verformungen verknüpft und können durch Stoffgesetze beschrieben werden. Als Basis wird hierbei die einaxiale Druckfestigkeit verwendet, da sie die gebräuchlichste Ausgangsgröße für die Beurteilung der mechanischen Lösbarkeit eines Gesteins darstellt [74]. Der Zusammenhang zwischen Spannung σ und Dehnung ϵ wird für spröde Gesteine durch das HOOKE'sche Gesetz beschrieben. Hierbei erfolgt eine Verknüpfung der beiden Größen über den Elastizitätsmodul E . Dieser entspricht als Proportionalitätskonstante der Steigung der Geraden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm und kann nach THURO [92] als Zähigkeit der zu zerstörenden Gesteine verstanden werden. Wie auch bei anderen Werkstoffen kann er als ein Maß für das lineare Verformungsverhalten des jeweiligen Gesteins angesehen werden. In Abhängigkeit der Spannungs-Verformungs-Beziehung werden Gesteine in drei Kategorien eingeteilt, Abb. 2.5.

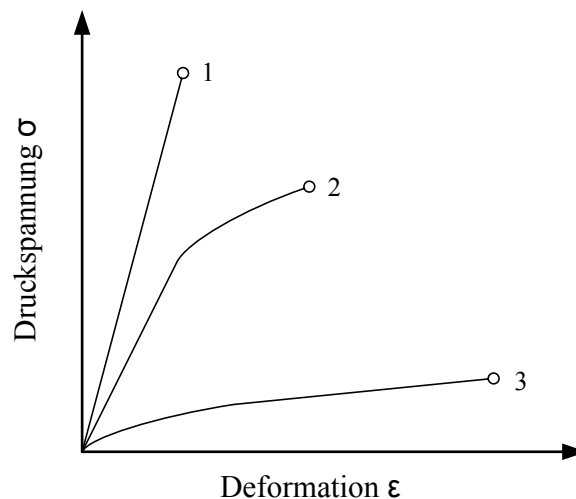


Abb. 2.5: Einteilung der Gesteine nach ihren allgemeinen Verformungseigenschaften nach ARNOLD [9]
 1 - elastisch-spröde Gesteine
 2 - elastisch-plastische Gesteine
 3 - bruchfreie und plastische Gesteine

Bei elastisch-spröden Gesteinen ist der Zusammenhang zwischen Druckspannung und Stauchung bis zum Erreichen der Elastizitätsgrenze linear. Die Verformung entlang der HOOKE'schen Geraden ist hierbei reversibel. Bei Gestein gilt dies nur für kleine Ver-

formungen. Die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins ist als Höchstwert der Druckspannung zu sehen. Elastisch-plastische Gesteine verhalten sich bis zum Erreichen der Fließgrenze ebenfalls linear und gehen dann in eine plastische Verformung über. Die dritte Gruppe sind die bruchfreien, plastischen Gesteine, welche ohne eine signifikante Fließgrenze direkt in den plastischen Bereich übergehen. Eine weitere wichtige Größe, die aus den einaxialen Versuchen hervorgeht, ist die seitliche Dehnung der Probekörper infolge axialer Belastung. Das Verhältnis zwischen Querdehnung und axialer Kompression wird durch die Querdehnungszahl ν beschrieben. Bei Gestein ist ν zwischen 0,1 und 0,4 einzuordnen. Somit besteht die Möglichkeit, auch im dreidimensionalen Modell das Spannungs-Verformungs-Verhalten für ein Verhalten entlang der HOOKE'schen Geraden zu beschreiben. Über den Elastizitätsmodul und die Querdehnungszahl können der Schub- und Kompressionsmodul (G, K) berechnet werden [7, 40]. Je nach Druck, Temperatur, Werkstoffgeometrie und Belastungsgeschwindigkeit während der einzelnen Versuche kann es zu Abweichungen bei den Ergebnissen kommen. Weiterhin sind auch Inhomogenitäten im Gestein mit zu berücksichtigen.

Modellbildung anhand von Versuchen

Um die natürlichen Vorgänge während der unterschiedlichen Bruchvorgänge im Gestein zu beschreiben, können verschiedene Modelle verwendet werden. Diese stützen sich auf idealisierte Annahmen, um eine vergleichbare Darstellung des jeweiligen Versagenszustandes zu geben.

Das MOHR-COULOMB'sche Versagenskriterium stellt in der Beschreibung von Festgesteinen eine empirisch ermittelte Versagensgrenze dar. Als Voraussetzung ist ein geradliniger Zerspanungsvorgang anzunehmen. Des Weiteren sind die Werkzeuggeometrie und die Belastungsannahmen, sowie die Belastungszonen zwischen Gestein und Werkzeug zu definieren. Da nach COULOMB das plastische Versagen durch eine Scherbeanspruchung beschrieben wird, kann auch eine Scherspannung für jedes Gestein ermittelt werden. Die nötige Scherspannung zum Verschieben der Gesteinsoberflächen zueinander sind abhängig von der auflastigen Normalspannung σ_1 (Abb. 2.6) und dem Reibungswinkel φ im Gestein.

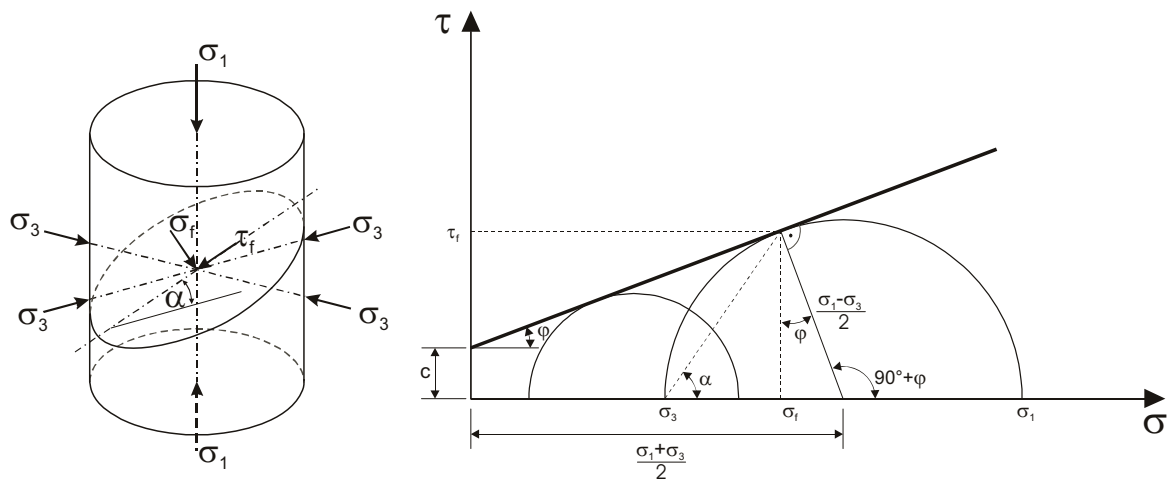


Abb. 2.6: Modellvorstellung nach dem MOHR-COULOMB'schen Versagenskriterium [46]

Die Darstellung der Spannungen in einem Körper können nach MOHR in einer Ebene erfolgen. Dabei werden die Spannungen, die normal und schiebend zu der Ebene wirken, dargestellt. Findet nun eine Rotation um einen beliebigen Punkt im Kontinuum statt, bildet sich ein Spannungskreis. Für den einaxialen Fall stellt sich die Abhängigkeit wie in Gleichung 2.1 dar.

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.1)$$

Folgend sind die einzelnen Größen näher erläutert.

c – Kohäsion zwischen den Bruchflächen

τ – Scherfestigkeit des Gesteins

φ – Winkel der inneren Reibung

σ – Normalspannung auf die Bruchfläche

Der Winkel der inneren Reibung ist mit dem Bruchwinkel α über Gleichung 2.2 geometrisch wie folgt verknüpft.

$$\alpha = 45^\circ \pm \frac{\varphi}{2} \quad (2.2)$$

Bei der Grundlage eines zylindrischen Probekörpers können über die Fläche der Ellipse, welche zur Querschnittfläche um den Winkel α geneigt ist, die Normal und Tangentialspannungen in Abhängigkeit der aufgebrachten Auflast F ermittelt werden. Die Indizes N und T stehen jeweils für die Normal- und Tangentialkraft an der Rissfläche.

$$\sigma = \frac{F_N \cdot \cos \varphi}{A} = \frac{F}{A} \cdot \cos^2 \varphi \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{F_T \cdot \cos \varphi}{A} = \frac{F}{2 \cdot A} \cdot \sin 2\varphi \quad (2.4)$$

Aus diesen Zusammenhängen ist es möglich, die einzelnen Kräfte, normal und schierend zur Trennfläche, für jeden Reibungswinkel zu bestimmen und in eine Werkzeugauslegung einfließen zu lassen. Um die Darstellung in den Raum auszudehnen, kann zunächst der biaxiale und nachfolgend der triaxiale Fall betrachtet werden. Hierbei ergeben sich weitere Spannungen, die auf die Scherebene wirken. Die scheinbar wachsende Gesteinsdruckfestigkeit erklärt sich aus den Steigerungen der Normalspannungen. Hierfür setzt sich der Spannungstensor für den dreidimensionalen Fall (Abb. 2.7) wie folgt zusammen, Formel 2.5:

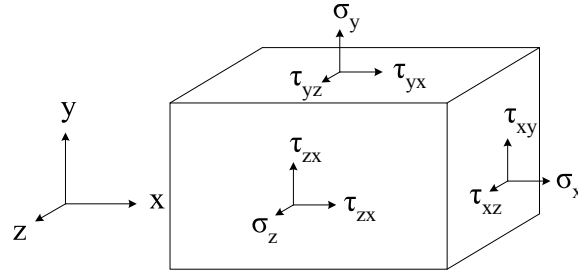


Abb. 2.7: Spannungstensor für triaxialen Fall

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_z & \tau_{zy} & \tau_{zx} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yx} \\ \tau_{xz} & \tau_{xy} & \sigma_x \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Die einzelnen Spannungen bei unterschiedlichen Reibungswinkeln sind aus diesen Beziehungen bestimmbar. In der allgemeinen Gesteinsmechanik werden Triaxialversuche an zylindrischen Proben durchgeführt und es wird eine Bruchhüllkurve erstellt. Hiermit können Aussagen über Kohäsion des Gesteines gemacht werden (Abb. 2.8).

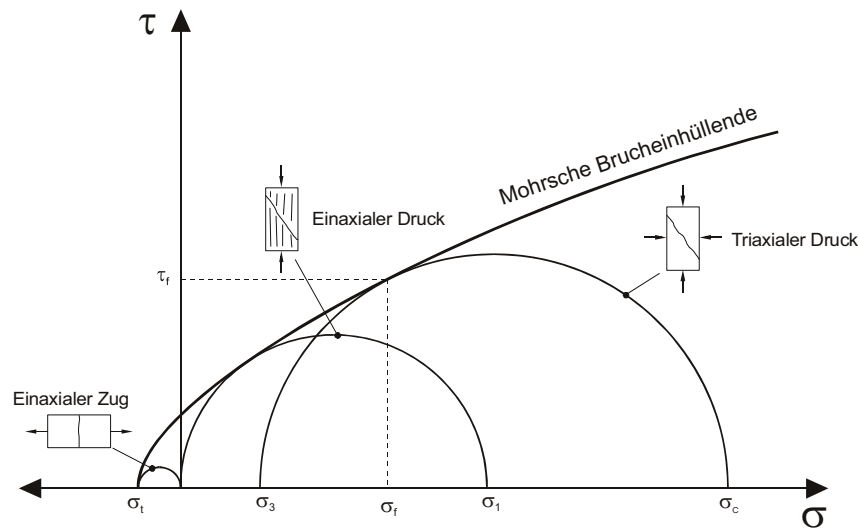


Abb. 2.8: Bruchhüllkurve um MOHR'sche Spannungskreise mit dem nichtlinearen HOEK BROWN Kriterium [46]

Wird die Bruchhüllkurve linearisiert, so wird vom MOHR-COULOMB'schen Versagenskriterium gesprochen. Diese Anpassung ist nur sinnvoll, wenn die Hauptspannungen sehr klein sind, da bei größeren Spannungen und Drücken Zerstörungsprozesse im Porenraum eine größere Rolle (Porenraumkollaps) spielen. Diese Erscheinungen haben zur Folge, dass die Hüllkurve wieder abfällt, bis der hydrostatische Spannungszustand bereits zum Versagen führt. Auch haben Triaxialversuche gezeigt, dass eine lineare Näherung der Umhüllenden nicht immer mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt. Dieses Verhalten wird durch verschiedene Bruchmechanismen bei verschiedenen Beanspruchungen hervorgerufen. Eine Anpassung ist durch ein parabolisches Modell nach HOEK und BROWN [48] möglich.

Eine weitere Methode zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens stellt die Methode von GRIFFITH dar. Wie durch PARRY [70] beschrieben, geht dieser von sprödem Material mit einem eingebrachten Riss aus, Abb. 2.9.

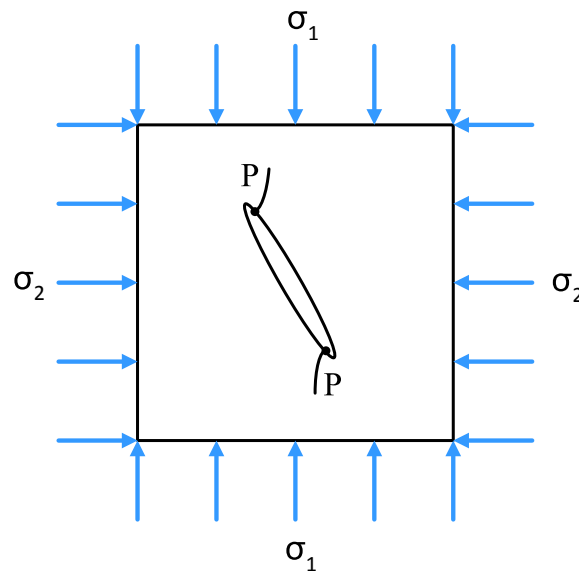


Abb. 2.9: Elliptischer Riss mit den Versagenspunkten (P) nach GRIFFITH [70]

Der Bruch wird durch das Überschreiten der Bruchfestigkeit am Ende von Mikrorissen erreicht. Als Ausgangspunkt für solche Brüche werden z.B. kleine Risse, Klüfte oder Korngrenzen betrachtet. Der hieraus abgeleitete Zusammenhang gestaltet sich wie folgt:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 8 \cdot \tau_0 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) = 0 \quad (2.6)$$

Signifikant für diese Darstellung ist, dass bei fehlender seitlicher Belastung des Probekörpers eine einaxiale Druckfestigkeit von $8\tau_0$ angenommen wird. Als wesentlicher Nachteil kann bei dieser Hypothese herangezogen werden, dass keine Unterscheidung für die durch Risse induzierten Spannungen in das Material gemacht wird (geschlossene Risse).

2.3.2 Einfluss von dynamischen Belastungen

Die allgemeinen bruchmechanischen Theorien setzen quasistatische Belastungen voraus. Für eine Beanspruchung von kristallinem Festgestein werden erfahrungsgemäß oftmals Schlag- oder Stoßbelastung verwendet. Diese plötzliche Beanspruchung eines Körpers ist als dynamische Belastung einzustufen. In diesem Fall spielen Trägheitskomponenten bei der Ermittlung von Kräfteverläufen, im Hinblick auf das sich einstellende Bruchverhalten, eine entscheidende Rolle. Eine schlagartige Beanspruchung führt zu einer Änderung des Materialverhaltens und der jeweilige Körper verhält sich meist spröder als im statischen oder quasistatischen Belastungsfall. Unter schlagartiger dynamischer Belastung versagt ein Körper erfahrungsgemäß früher, als unter einer langsam

aufgebrachten Last. Als Grund sind die kleineren plastischen Verformungen im Körper zu sehen. Diese sind, wenn auch äußerst gering, an dem spröden Bruchverhalten von Gestein beteiligt. Im dynamischen Beanspruchungsfall ist der Einfluss der lokalen plastischen oder viskosen Deformation minimiert, so dass ein Sprödbbruchverhalten des Körpers früher zum Tragen kommt. Eine weitere Randerscheinung der dynamischen Belastung ist eine Spannungserhöhung an den Rissspitze, die durch das Fehlen eines Spannungsabbaus mit Hilfe plastischer Verformungen hervorgerufen wird. Als Grund ist nach GROSS und BERTRAM [47, 15] das träge Verhalten des zu zerstörenden Körpers zu sehen. Zur Berechnung schlagartiger Ereignisse kann eine Betrachtung der Wellenausbreitung in Körpern als Basis dienen. Hierbei können unterschiedliche Wellentypen auftreten, wie in Abb. 2.10 schematisch dargestellt.

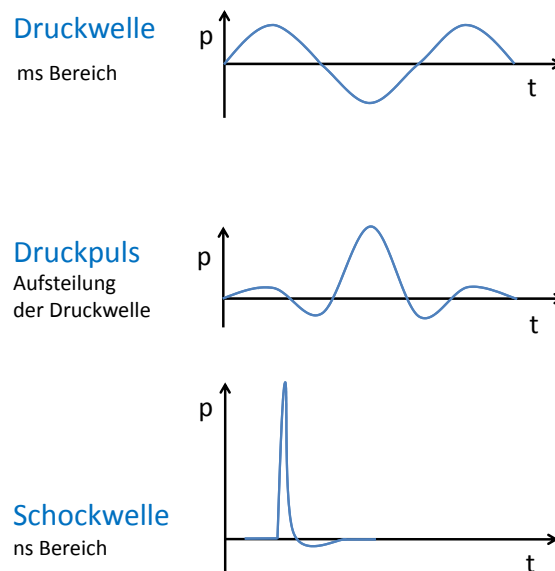


Abb. 2.10: Druckverläufe unterschiedlicher Wellentypen

Nach SCHUBERT [85] steigt der Einfluss dieser Wellen auf das Bruchverhalten, je kleiner das Verhältnis zwischen der Stoßdauer und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen im Körper ist. Materialdefekte innerhalb des Gesteins wirken bruchfördernd unter Belastung mit elastischen Wellen. Weiterhin sind die Ausbreitungsrichtungen der Wellen im Körper zu unterscheiden. Eine Einteilung in Longitudinal-, Tansversal- und Oberflächenwellen wird im allgemeinen getroffen. Die versuchstechnisch zu ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten stellen Materialkonstanten dar. Beim Durchgang durch einen Körper pflanzen sich Longitudinalwellen als Druckwellen und Transversalwellen als Scherwellen fort. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind vom Spannungszustand im Gestein abhängig. Als Sonderfall für dynamische Betrachtungen haben zudem noch RAYLEIGHwellen, welche entlang der Oberfläche des Körpers laufen, Einfluss auf das Materialverhalten. Eine Berechnung für den ebenen Spannungszustand kann nach BERTRAM [15] mit den folgenden drei Formeln erfolgen.

$$\text{longitudinal } v_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad (2.7)$$

$$\text{transversal } v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \nu^2}} \quad (2.8)$$

$$\text{oberflächlich } v_R = \frac{0,86 + 1,14 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot v_S \quad (2.9)$$

Dabei sind:

v_P	Longitudinalwellengeschwindigkeit in m/s
v_S	Transversalwellengeschwindigkeit in m/s
v_R	Rayleighwellengeschwindigkeit in m/s
ρ	Dichte des Körpers in kg/m^3
ν	Querdehnungszahl

Zur größtmäßigen Einordnung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Gesteinen können Longitudinalwellen im Bereich von 5000 bis 7000 m/s auftreten. Transversalwellen sind bei etwa 4500 m/s einzuordnen. Die sich oberflächlich ausbreitenden RAYLEIGHwellen liegen bei etwa 90 % der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Transversalwellen.

2.3.3 Eindringfestigkeit

Um einen drückenden Gesteinszerstörungsprozess einzuleiten, reicht es bei sprödem Gestein nicht aus, dessen einaxiale Druckfestigkeit zu überwinden. Vielmehr muss eine wesentlich höhere Spannung aufgebracht werden. Dieser Widerstand wird in der Bohrtechnik als Eindringfestigkeit bezeichnet. Weitere verbreitete Begriffe sind Schwellendruck bzw. dynamische Festigkeit. Die Eindringfestigkeit bewegt sich zwischen dem 5- und 20-fachen der einaxialen Druckfestigkeit des zu zerstörenden Gesteins (Verhältnis Schwellendruck zu Druckfestigkeit für Gesteine mit hohen Festigkeitskennwerten 8-12, sehr spröde Gesteine ≥ 13). Dieser Faktor beschreibt quantitativ die Spannung, welche zum Aktivieren des Gesteinszerstörungsprozesses aufgebracht werden muss. Das heißt, der Anpressdruck muss so groß sein, dass das Gestein durch Mikro- oder Makrorissbildung zerstört wird. Bei diesem Vorgang platzt mehr Gestein aus dem Verband heraus als z. B. der Bohrmeißelzahn belastet [9]. Dieser Vorgang kann durch das spröde Verhalten des Gesteins erklärt werden. Folglich benötigt ein Meißelzahn mehr Energie zum Eindringen, da mehr Gestein zerstört wird, als direkt unter ihm liegt. Diese Gesetzmäßigkeit gilt für das Bohren mit Rollenbohrwerkzeugen und ist auch auf das schlagende

Bohren übertragbar. Die Werte werden versuchstechnisch für jedes Gestein bestimmt, vgl. Abb. 2.11.

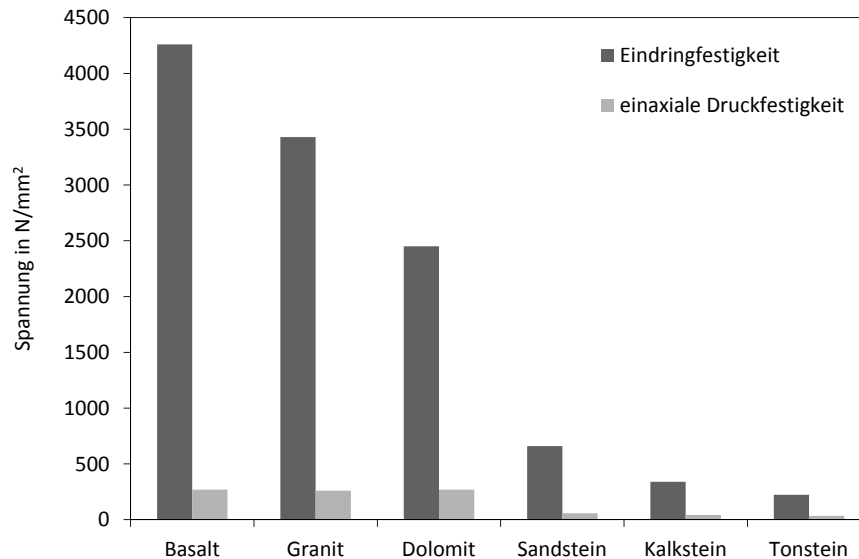


Abb. 2.11: Werte für Schwellendruck und Gesteinsdruckfestigkeit nach ARNOLD [9]

2.3.4 Härte

Wie die Festigkeit hat auch die Härte des Gesteins einen starken Einfluss auf die Bohrbarkeit. Sie wird definiert als der mechanische Widerstand eines Körpers gegen das Eindringen eines anderen Körpers [37]. Physikalisch beschreibt sie die Festigkeit der Bindungen zwischen den Atomen [63]. Zur Ermittlung der Härte bei Gesteinen wird auf verschiedenste Prüfverfahren aus unterschiedlichen ingenieurtechnischen Richtungen zurückgegriffen. Als einige Vertreter solcher Verfahren sind die Prüfverfahren nach BRINELL, VICKERS, ROCKWELL und SHORE zu nennen. Durch die verschiedenen Verfahren haben sich auch unterschiedliche Härteskalen herausgebildet. Hier sind neben den schon genannten Verfahren noch die Skalen nach MARTENS, MOHS und BARCOL sowie KNOOP aufzuführen. Die Skala nach MOHS z. B. bedient sich dem Ritzen eines weichen mit einem härteren Stoff, wodurch eine qualitative Aussage zur Härte getroffen werden kann. Als Problem bei der Härtebestimmung von Gesteinen hat sich der Aufbau als Kristallstruktur mit unterschiedlich harten Anteilen herausgestellt. Da Gestein oftmals aus verschiedenen Mineralkomponenten besteht, können die gemessenen Härtewerte stark streuen. Um Messabweichungen durch diesen Umstand entgegenzuwirken, werden bei der Härteprüfung nach SCHREINER unterschiedlich große Hartmetallkugeln verwendet, Abb. 2.12. Infolgedessen werden Mischungen aus den Kristallbestandteilen beansprucht. Als Vertreter der dynamischen Prüfverfahren ist die Beanspruchung durch Abprallversuche zu nennen. Ein solches Verfahren kommt z. B. bei Kunststein (Betonen) im Rahmen von Bauwerkskontrollen mit dem SCHMIDT'schen Prallhammer

zur Anwendung. Dabei wird die Rückprallhöhe einer Metallkugel von der Oberfläche gemessen. Diese Kugel wird zu Beginn des Versuches mit definierter Geschwindigkeit auf den Kunststein geschossen.

Gesteinsklassen		I				II				III			
Härtewerte nach SCHREINER		0 - 100	100 - 250	250 - 500	500 - 1000	1000 - 1500	1500 - 2000	2000 - 3000	3000 - 4000	4000 - 5000	5000 - 6000	6000 - 7000	7000 - 15000
Tonige Gesteine	Ton	■											
	Schieferton		■										
	Tonmergel	■	■										
	Tonstein		■	■	■								
	verkiezelte Tonschiefer			■	■	■							
Geschichtete Schluffsteine	mit tonigem Bindemittel			■	■								
	porös mit tonigem Bindemittel			■	■	■							
	mit karbonatischem Bindemittel				■	■							
	kontaktartig gebunden				■	■	■						
Quarzitische Sandsteine	mit tonigem Bindemittel				■								
	mit organischem oder sulfatischem Bindemittel				■		■	■					
	kontaktartig gebunden			■	■	■	■						
	umgelagert gebunden							■	■	■			
Kalksteine	organogener Kalkstein	■	■	■	■	■							
	toniger Kalkstein		■	■	■	■							
	feinkörniger Kalkstein		■	■	■	■	■						
Dolomitische Gesteine	toniger Dolomit		■	■	■	■	■						
	feinkörniger Dolomit		■	■	■	■	■	■					
	mittelkörniger Dolomit						■	■					
Sulfatgesteine	Gips			■									
	Anhydrit							■	■				
Kieselige und Kieselgesteine										■	■	■	■

Abb. 2.12: Härteskala nach SCHREINER [9]

2.3.5 Sprödigkeit und Plastizität

Eine zum Lösen von Gesteinen wichtige Größe ist die Sprödigkeit. Sie bezeichnet die Neigung zu Rissbildung bei Beanspruchung durch Druck oder Schläge. Durch hohen Gebirgsdruck verlieren manche Gesteine ihre Sprödigkeit und verhalten sich plastisch. Da es noch keine Klassifizierung von Gesteinen hinsichtlich der Sprödigkeit gibt, ist nur eine qualitative Angabe möglich.

Die Plastizität von Gesteinen spielt eine Rolle bei Konvergenzen in untertägigen Hohlräumen und ist z. B. bei Salzgesteinen oft in großen Teufen ausgeprägter als in Oberflächennähe. Als weitere Beispiele für Gesteine mit hoher Plastizität sind Ton- sowie einige Sedimentgesteine aufzuführen. Bei einer zusammengesetzten Beanspruchung z. B. durch einen Rollenmeißel sind plastische Verformungen eher unerwünscht, da die Löseenergie zur Umlagerung genutzt wird, und nicht mehr zum Trennen des Gesteines zur Verfügung steht.

2.3.6 Abrasivität

Die Eigenschaft eines Gesteins dem Bohrwerkzeug Verschleiß zuzufügen wird als Abrasivität bezeichnet. Als markante Größe wird der äquivalente Quarzgehalt nach SCHIMAZEK [82] im zu bohrenden Gestein als Index für die Abrasivität herangezogen. Weiterhin spielen die Verkittung, die Größe der Quarzkristalle und deren Vorliegen, amorph oder kristallin, eine wichtige Rolle. Als anerkannte Testmethode hat sich weiterhin der der Cherchar Abrasivitäts Index Test (CAI) heraus kristallisiert, Abb. 2.13. Die Abriebfestigkeit stellt den gegenüberliegenden Verschleißpartner dar und definiert somit das Werkzeug. Hierfür werden Materialproben mit einer definierten Auflast auf eine rotierende Scheibe mit dem anderen Verschleißpartner gepresst, wie in Abb. 2.14. Diese Verfahren sind auch für Anwendungen rein anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe geeignet, wie nach DIN 52108 [31].

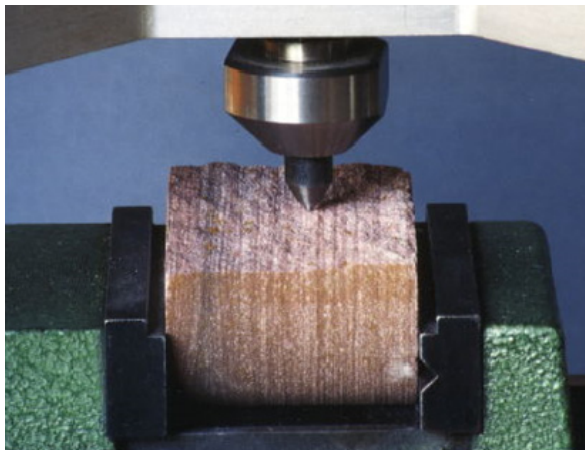


Abb. 2.13: Cerchar abrasivity test [72]



Abb. 2.14: Bestimmung von Abriebfestigkeiten nach BÖHME [1]

Die Quantifizierung erfolgt hierbei über den fortschreitenden Materialverlust am Probekörper, beim CAI speziell über die sich einstellende Größe der Verschleißfläche mit der Einheit 0,1 mm [41, 90]. Ein Verfahren, das seit 2002 Anwendung findet, ist die Bestimmung des Rock Abrasivity Index (RAI). Dieser ist ähnlich dem Verschleißkoeffizienten nach SCHIMAZEK. Der RAI verknüpft die einaxiale Druckfestigkeit, die ROSIVAL Schleifhärte, den Anteil der Mineralarten und deren Anzahl. Die Berücksichtigung schleißscharfer Minerale und die Festigkeit des Gefügeverbandes stellt nach PLINNINGER [73] eine praxisbezogene Kenngröße für den Abrasivverschleiß dar.

2.4 Hartstoffe

2.4.1 Anwendung und Aufbau

Hochfeste Materialien kommen hauptsächlich bei Anwendungen zum Einsatz, bei denen Härte und Verschleißfestigkeit im Vordergrund stehen. Als charakterisierende Eigenschaften dieser Materialien können die folgenden Punkte angeführt werden.

- Härte nach VICKERS HV > 1000
- hohe Verschleißfestigkeit
- hohe Schmelzpunkte
- chemische Beständigkeit

Für die Schneidstoffwahl sind je nach Zerspanungsaufgabe weitere Eigenschaften maßgebend. Neben einer hohen Härte und Druckfestigkeit sollte ein idealer Schneidstoff auch eine hohe Biegefestigkeit und Zähigkeit aufweisen. Die Resistenz gegen Verschleiß kann als Kombination von Härte und Zähigkeit gewertet werden. Für eine Aussage zur Resistenz gegen instabilen Rissfortschritt kann die Bruchzähigkeit und hiermit der kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} genutzt werden. Nach BARGEL [13] bezeichnet dieser die Größe der verbrauchten Energie zum Vorantreiben eines Risses bis zum Bruch der Probe. Im Allgemeinen nimmt mit steigender Härte des Werkstoffes die Bruchzähigkeit ab, wie in Abb. 2.15 für Wolframcarbid dargestellt.

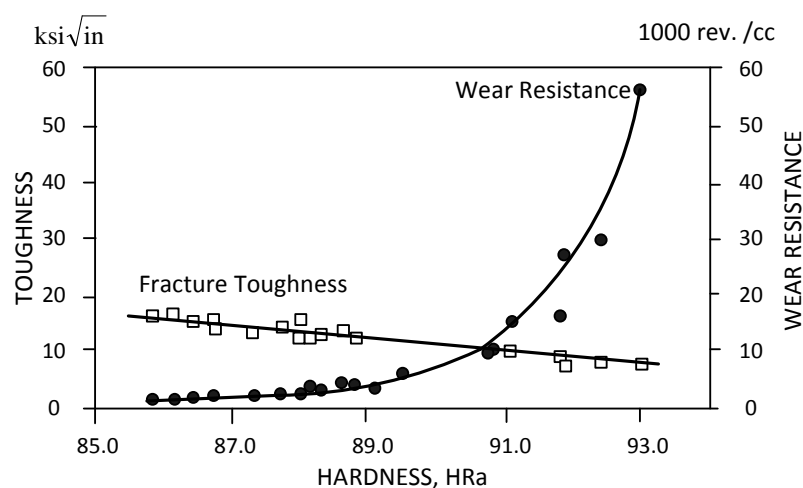


Abb. 2.15: Bruchzähigkeit und Verschleißbeständigkeit in Abhängigkeit der Härte bei Wolframcarbid nach LYONS [59]

Die Beständigkeit von Hartstoffen gegen hohe Temperaturen sollte mit einer hohen Temperaturwechselfestigkeit einhergehen. Laut DEGNER [22] lassen sich Schneidstoffe mit wachsender Festigkeit wie nachfolgend einteilen.

- Werkzeugstähle, unlegiert und legiert
- Schnellarbeitsstähle, beschichtete Schnellarbeitsstähle
- gegossene Hartlegierungen (Stellite)
- Hartmetalle (Sinterhartmetalle), beschichtete Hartmetalle
- Cermets
- Schneidkeramik
- superharte Schneidstoffe (Diamant, Bornitrid)

Die Einsatzfelder von Schneidstoffen lassen sich relativ zueinander wie in Abb. 2.16 darstellen.

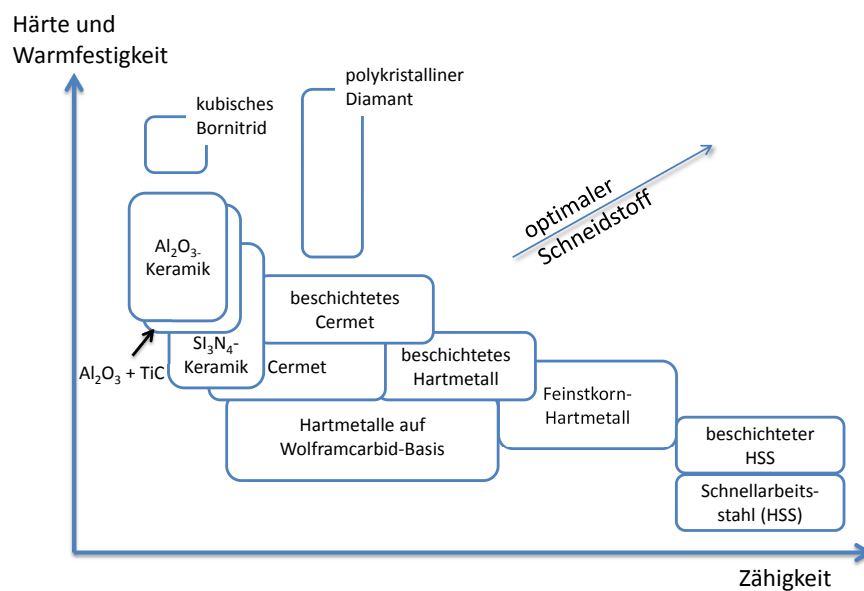


Abb. 2.16: Einsatzgebiete von Schneidstoffen nach KLOCKE [51]

Als superharte Schneidstoffe gelten in der Zerspanungstechnik die in Tab. 2.3 aufgeführten Materialien.

Tab. 2.3: Chemische Zusammensetzung von Hartstoff-Werkstoffen

Hartstoff	chemische Zusammensetzung
Diamant	C (nicht metallisch)
Kubisches Bornitrid	CBN (nicht metallisch)
Borcarbid	B_4C (nicht metallisch)
Titandiborid	TiB_2 (metallisch)
Titancarbid	TiC (metallisch)
Siliciumcarbid	SiC (nicht metallisch)
Titannitrid	TiN (metallisch)
Korund	Al_2O_3 (nicht metallisch)
Siliciumnitrid	Si_3N_4 (nicht metallisch)

Eine weitere Unterteilung von Hartstoffen kann in metallische und nichtmetallische erfolgen. Ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl ist z. B. die Leitfähigkeit, die je nach

Anwendungsfall, erwünscht bzw. unerwünscht ist. Die Anwendungen all dieser Schneidstoffe sind sehr vielfältig (Tab. 2.4) und reichen vom mikroskopischen Bereich, z. B. Platinenbohrer, bis in makroskopische Umgebungen von Verschleißflächen und Industrieanlagen.

Tab. 2.4: Anwendungsgebiete von Hartstoffen

Werkzeuge	Hochtemperatur-Anwendungen	Konstruktionskeramik
Bohrköpfe (WC in Metallmatrix)	feuerfeste Steine (Carborundsteine, SiC)	Motoren, Turbinen (Si ₃ N ₄)
Schleifmittel	Heizwiderstände (Siliciumstäbe, SiC)	
Presswerkzeuge (ZrO ₂ -Mo)	Thermometerschutzrohre, Kokillen, Tiegel (ZrO ₂ -Mo)	
Schneidkeramik (Al ₂ O ₃ -Mo-Cr; TiC / TiN-Ni)	Hochtemperatur-Heizleiter (MoSi ₂)	
Keramische Strahlmittel	Verbrennungskammern, Auskleidung von Gasturbinen (MoSi ₂ TiC)	

2.4.2 Werkzeugstähle und Schnellarbeitsstähle

Werkzeugstähle lassen sich in unlegierte (Kaltarbeitsstähle) und legierte Werkzeugstähle (Warmarbeitsstahl) unterteilen. Kaltarbeitsstähle besitzen einen Kohlenstoffanteil von 0,6 bis 1,35 %, je nach Anforderungen an die Härtebarkeit des Stahles. Sollte eine schlagende Beanspruchung vorgesehen sein, werden Gehalte an Kohlenstoff von unter einem Prozent, bei hoher Verschleißbeanspruchung von über einem Prozent angestrebt. Warmarbeitsstähle besitzen einen geringeren Kohlenstoffanteil, zwischen 0,2 und 1,5 %. Des Weiteren sind noch geringe Mengen von Legierungselementen, wie Wolfram, Chrom, Cobalt und Vanadium, einzeln oder in Kombination, enthalten. Durch die geringe Warmhärte, gemessen bei um 300 °C, werden diese Stähle weniger im Maschinenbau als zunehmend in der Holz und Gesteinsbearbeitung eingesetzt [22], da dort durch die geringeren Schnittgeschwindigkeiten weniger thermische Beanspruchung erfolgt. Als Schnellarbeitsstähle (HS nach DIN EN ISO 4957 [27]) sind hochlegierte Werkzeugstähle zu verstehen, die sehr zäh und unempfindlich gegen wechselnde Kräfte sind. Sie weisen akzeptable Warmhärten bis zu einer Grenze von etwa 600 °C auf und sind geeignet für Werkzeuge mit großen Spanwinkeln sowie kleinen Keilwinkeln. Eine Unterteilung der Schnellarbeitsstähle erfolgt nach den Wolfram- und Molybdängehalten in verschiedene Leistungsgruppen. Um eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffgruppen zu erreichen, werden oberflächenhärtende Behandlungsverfahren, Hartverchromen, Nitrieren und Carbonitrieren, angewandt. Beschichtungen mit Titanitrid oder Titancarbid in Dicken von 2 bis 4 µm, sorgen durch die gesteigerte Oberflächenhärte sowie die geringere Oberflächenrauigkeit zu Standzeiterhöhungen.

2.4.3 Gegossene Hartlegierungen

Gegossene Hartlegierungen bestehen zum überwiegenden Teil aus Carbiddbildnern wie Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram. Mit diesen wird das Grundmetall aus der Eisengruppe legiert. Die Formgebung wird durch den Gussprozess erreicht, wobei eine Nachbearbeitung durch Schleifen erfolgt. Der Vorteil gegenüber Schnellarbeitsstahl ist in der höheren Warmhärte zu sehen. Dem gegenüber steht eine höhere Sprödigkeit, welche die Einsatzgrenzen als Schneidstoff limitiert. Die hohe Widerstandsfähigkeit gegen schleißende Beanspruchung hat dazu geführt, dass diese Materialien ein breites Anwendungsfeld als Auftragsschweißlegierungen finden.

2.4.4 Hartmetall

Hartmetalle bestehen aus einem weichen metallischen Bindemittel, Volumenanteil bis zu 20 %, und darin eingelagerten harten Carbiden. Dies können Titan-, Wolfram-, Tantalcarbid oder auch Titannitrid sein. Im Allgemeinen wird als Bindemittel Cobalt verwendet. Nach DIN ISO 513 [36] werden Hartmetalle je nach ihren Bestandteilen, überwiegend aus Wolframcarbid oder aus Titancarbid und Titannitrid untergliedert. Hartmetalle, die zu einem Großteil aus Wolframcarbid bestehen, haben eine hohe Verschleißfestigkeit und zeichnen sich durch ihre hohe Zähigkeit aus. Diese wirkt sich positiv auf die ertragbaren, mechanischen Belastungen aus. Dem gegenüber stehen die titancarbidhaltigen Schneidstoffe, die neben Wolframcarbid bis zu 60 % Titancarbid enthalten. Durch diesen Zusatz steigt die Härte und sie widerstehen der Neigung zum Verschweißen des Spanes auf der Spanfläche besser (Aufbauschneidenbildung). Weiterhin ergibt sich eine gesteigerte Oxidationsbeständigkeit bei höheren Schnitttemperaturen. Wenn kein Wolframcarbid zum Einsatz kommt, spricht man von so genannten Cermets (Ceramic and Metals). Hierbei handelt es sich um eine Binderphase aus Nickel, in der mindestens eine nichtmetallische Keramik eingebettet ist. Der keramische Anteil kann auch aus Titancarbid oder Titannitrid, mit einem Volumenanteil bis über 85 %, gebildet werden [57]. Seltener werden Niobcarbid bzw. Molybdän und Kobalt verwendet. Cermets besitzen aufgrund ihrer leicht verfügbaren Ausgangsstoffe einen Vorteil gegenüber den ursprünglichen Wolframcarbiden. Des Weiteren weisen sie einen geringeren mechanischen Verschleiß, bedingt durch eine höhere Härte, und einen geringeren Diffusionsverschleiß auf. Die beschichteten Hartmetalle haben, wie schon bei den Schnellarbeitsstählen, eine Erhöhung der Standzeiten zum Ziel. Dabei wird ein zäher Grundkörper mit sehr harten und verschleißfesten Schichten aus Titancarbid, Titannitrid, Titancarbonitrid, Aluminiumoxid, Titanaluminiumnitrid, Chromnitrid oder Zirkoncarbonitrid veredelt.

Meist wird das CVD (chemical vapour deposition) Verfahren angewandt. Die aufge-

brachte mehrlagige Schicht weist eine maximale Gesamtdicke von $25\text{ }\mu\text{m}$ auf. Vorteile bietet das Beschichten in Bezug auf die Standzeiten der Werkzeuge durch extrem harte, gleitfähige oder weiche, schmierende Oberflächen. Als Nachteil ist aus maschinentechnischer Sicht die Erhöhung der Radien an den Schneidenecken zu sehen. Härte und Zähigkeit sind abhängig von der Zusammensetzung der Carbide und des Ausgangspulvers bei der Herstellung. Je nach Mahlvorgang weisen die Carbide eine Größe von $1 - 10\text{ }\mu\text{m}$ auf, können aber auch deutlich darunter liegen. Wenn die Hartmetalle aus sehr fein gemahlenen Pulvern erzeugt werden ($0,2 - 1\text{ }\mu\text{m}$), bezeichnet man sie als Feinstkornhartmetall. Durch diese Feinstmahlung der Carbidkörner können gleichzeitig hohe Härten und Biegefestigkeiten erzielt werden, ohne eine Veränderung der Binderphase [84] vorzunehmen. Anwendungen sind in der Zerspanung von gehärtetem Stahl zu sehen.

Die einzelnen Komponenten werden durch Sintern verarbeitet. Das Sintern ist ein Vorgang, bei dem die metallurgische Bindung von Partikeln unterhalb ihrer Schmelzgrenze erhöht wird.

Die Anforderung an die Herstellung von Hartmetall lassen sich wie folgt zusammenfassen. Das Material des Matrixwerkstoffs muss beim Sintern flüssig sein und die Hartstoffteilchen müssen sich homogen binden. Des Weiteren müssen die Hartstoffteilchen vollständig benetzbar sein. Beim Erreichen der Sintertemperatur soll die Hartstoffphase in der Schmelze gelöst sein und beim Abkühlen muss sich der Hartstoffanteil ausscheiden. Das Bindemittel darf mit dem Hartstoff nicht zu einer gemeinsamen Phase verschmelzen. Um diese Vorgaben zu erreichen, wird oftmals der Gesamtprozess in das Vor- und Fertigsintern geteilt. Für das Herstellen von Hartmetall stehen die folgenden Verfahren zur Verfügung.

- Heißpressen
- Heißisostatisches Pressen
- Spark Plasma Sintering (SPS)/ Field Assisted Sintering Technique (FAST)
- Rapid Omnidirectional Compaction (ROC)

Bei diesen Verfahren ist tendenziell die Steigerung der Härte mit einer Zähigkeitsabnahme verbunden. Die Zähigkeit ist abhängig vom Anteil an Binderphase im zu erzielenden Verbundwerkstoff. Auch die Warmhärte von ungefähr $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ hängt zum größten Teil vom Binder ab, da dieser den niedrigsten Schmelzpunkt aufweist. Ein wichtiger Vorteil von Hartmetall ist die hohe Temperaturbeständigkeit, welche für den jeweiligen Anwendungsfall durch die gezielte Auswahl der Ausgangsstoffe eingestellt werden kann. In der Gesteinsbohrtechnik dominieren Werkzeuge mit eingelöteten Hartmetallschneidplatten oder -Stiften, Abb. 2.17. Hartmetallschneidstoffe können neben Stahl

und Gusseisen auch harte Werkstoffe wie Glas und Porzellan spanend bearbeiten. Sie werden meist in Form von Wendeschneidplatten eingesetzt, es gibt sie aber auch als Werkzeuge aus Vollhartmetall oder als eingelötete Inserts auf einem Werkzeugkörper aus Stahl (z. B. Betonbohrer).



Abb. 2.17: Eingelötete Hartmetalle an einer Schlitzwandfräse der Firma BAUER

2.4.5 Schneidkeramik

Als keramische Werkstoffe werden alle nichtmetallisch anorganischen Sinterwerkstoffe bezeichnet [37]. Schneidkeramiken lassen sich nach DEGNER [22] in drei Gruppen unterteilen: Oxidkeramik, Nichtoxidkeramik und Mischkeramik. Die heutigen Schneidkeramiken werden zum Großteil auf Aluminiumoxidbasis (Al_2O_3) hergestellt. Die Herstellung erfolgt analog zu Hartmetallen in einem Sinterverfahren. Schneidkeramiken weisen eine hohe Verschleißfestigkeit und Warmhärte auf. Der Verzicht auf Schwermetalle wie Wolfram oder Kobalt kann auch als ökonomischer Vorteil gegenüber Hartmetall gewertet werden. Generell sind Schneidkeramiken anfällig für schlagartige sowie wechselnde Beanspruchungen. Oxidische Schneidkeramik besteht aus fast reinem Aluminiumoxid und kann Temperaturen bis 2000°C ertragen. Eine wechselnde Temperaturbelastung sollte jedoch ausgeschlossen werden.

Von oxidischer Mischkeramik ist die Rede, wenn zur Basis von Aluminiumoxid bis zu 15 % dispergiertes Zirkoniumdioxid (ZrO_2) zugesetzt wird. Hierdurch wird ein geringer Verschleiß, durch Energieabsorption bei der Phasenumwandlung des ZrO_2 , sowie eine streuende Wirkung auf Risse erzielt.

Bei oxidischer Keramik, die im Allgemeinen nicht beschichtet ist, geht der Trend zu mehrlagigen TiCN-TiN-Beschichtung, wodurch die thermische Belastung der Schneide verringert wird. Der Grundstoff von Mischkeramik ist Aluminiumoxid, welches mit Hartstoffen wie Titancarbid, Wolframcarbid oder Titannitrid gesintert wird. Als Vorteil besitzt die Mischkeramik eine höhere Temperaturwechsel- und Kantenfestigkeit gegenüber oxidischer Schneidkeramik. Die letzte Gruppe der Schneidkeramiken stellen

die Nichtoxidischen dar. Sie bestehen, wie zum Beispiel Siliciumnitridkeramik (Si_3N_4), aus stäbchenförmigen, isotropen Siliciumnitrid-Kristallen und erzielen somit bessere Festigkeitswerte als Oxid- und Mischkeramik.

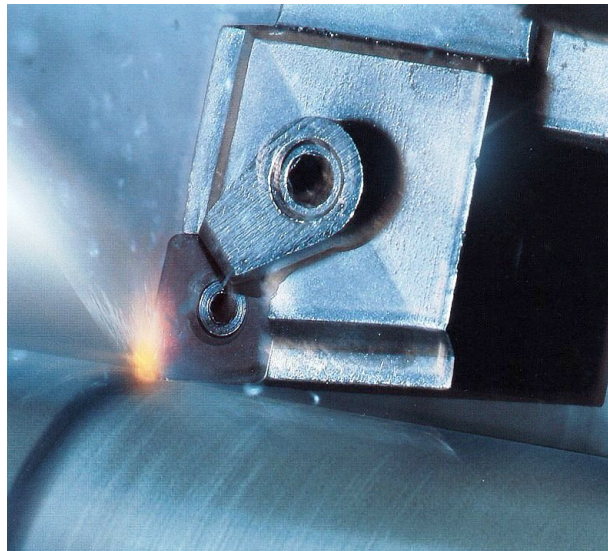


Abb. 2.18: Keramische Schneidstoffe im Maschinenbau [6]

Beim Einsatz von Schneidkeramik ist auf deren Eigenschaften Rücksicht zu nehmen. Da es sich um einen kristallinen Stoff handelt, ist besonders die Sprödigkeit ein limitierender Faktor. Auch die thermische Leitfähigkeit ist sehr klein, was Probleme beim Einsatz von Kühlmitteln (thermische Wechselbeanspruchung) mit sich bringen kann. Positiv wirkt sich die hohe Warmhärte aus, welche höchste Schnittgeschwindigkeiten ermöglicht.

2.4.6 Superharte Werkstoffe

Stoffe mit Härten nach VICKERS von mehr als 50 GPa , werden im Allgemeinen als superharte Werkstoffe bezeichnet. Hierzu zählen auch Diamant und kubisches Bornitrid. In Tab. 2.5 nach DEGNER [22] sind gängige Werkstoffe dargestellt.

Tab. 2.5: Härten von superharten Schneidstoffen

Bezeichnung	Härte nach VICKERS
Diamant, natürlich	100 GPa
Diamant, synthetisch	$90 - 100 \text{ GPa}$
Bornitrid	$50 - 90 \text{ GPa}$

Natürliche oder monokristalline Diamanten besitzen von allen Werkstoffen die größte Härte. Kleinste Eckenradien ($< 1 \mu\text{m}$) ermöglichen Oberflächenrauigkeiten bei zu bearbeitenden Werkstücken von kleiner $R_z = 0,02 \mu\text{m}$. Die Festigkeitskennwerte der

Einkristalle sind richtungsabhängig, so dass die richtige Einbaulage entscheidend für den Schneidvorgang ist. Trotz der hohen Härte sind Diamanten durch ihre geringe Wärmebeständigkeit und die hohe Affinität des Kohlenstoffs zum Eisen nur in sehr beschränktem Maße für die Bearbeitung von Stahl einsetzbar.



Abb. 2.19: Diamanten auf Sägeband zur Waferbearbeitung nach NAUMANN [66]

Ein weiterer Nachteil ist die hohe Bruchempfindlichkeit bei diesen Werkstoffe. Trotz dieser Einschränkungen ist durch die vielfach höhere Standzeit gegenüber Bornitrid ein Einsatz von Diamanten als Schneidstoff sinnvoll. Die Anwendungsgebiete liegen in der Bearbeitung von Nichteisen-Metallen oder z. B. Verbundwerkstoffen, die Keramik und vorgesinterte Hartmetalle mit einschließen. Zum Applizieren auf Werkzeugen werden das Hartlöten, Eingießen, Einsintern oder Kaltfassen angewendet. Die weitere Anwendung von Diamant findet als polykristalliner Werkstoff statt. Polykristalline Diamanten (PCD - polycrystalline diamond) werden in der Tiefbohrtechnik als Schicht auf Meißelplättchen aufgebracht, Abb. 2.20.



Abb. 2.20: Meißel aus der Tiefbohrtechnik mit PCD-Plättchen

Die Werkzeuge aus polykristallinem Diamant bestehen aus einem Hartmetallkern, auf

den eine dünne Metallschicht und folgend eine Schicht aus synthetischem Diamantpulver, aufgesintert wird, siehe HAAN-GRUITEN [95]. Der Herstellungsprozess ist zweistufig. Als erster Schritt wird mit Hilfe einer Hochdruck-Hochtemperatur-Synthese ein Diamant aus synthetischen Monokristallen hergestellt. Darauf folgend wird durch Hochdruck-Flüssigphasensintern aus diesen Diamanten eine polykristaline Matrix erzeugt. Ein wichtiger Vorteil polykristalliner Diamanten ist die richtungsunabhängige Festigkeit, die auf den Aufbau des Gefüges zurückgeht. Wie durch DEGNER [22] beschrieben, liegen die Schnittgeschwindigkeiten niedriger als beim monokristallinen Pendant, jedoch sind deutlich höhere Vorschubgeschwindigkeiten fahrbar, so dass eine Standzeiterhöhung um den Faktor 100 möglich wird. Ähnlich wie PCD wird auch kubisches Bornitrid (CBN) durch Hochdrucksynthesen gewonnen und durch Sinterprozesse weiterverarbeitet. Es handelt sich hierbei um einen nicht natürlich vorkommenden Rohstoff. Es stellt den zweit härtesten Schneidstoff nach dem Diamanten dar. Bei Bornitrid kann eine Unterscheidung in CBN und Binderphase und in CBN mit Titancarbid (TiC)/Titannitrid (TiN) getroffen werden. Kubisches Bornitrid wird aufgrund seiner Warmbeständigkeit bis zu 2000°C für die Bearbeitung von Eisenwerkstoffen, die hart und abrasiv sind, eingesetzt. Es eignet sich je nach Zusammensetzung für Grob- und Feinbearbeitung selbst von gehärteten Stählen. Durch das günstige Verschleißverhalten sind höhere Schnittgeschwindigkeiten, von bis zu 2000 m/min , als mit Hartmetall zu erreichen.

Bei der Herstellung von Keramiken und superharten Schneidstoffen ergeben sich in Bezug auf Bearbeitbarkeit und Herstellungsdrücke verfahrenstechnische Herausforderungen, die sich an folgende Randbedingungen knüpfen (Tab. 2.6).

Tab. 2.6: Herstellung keramischer und monokristalliner Hartstoffe

Verbindung	Druck	Temperatur	Besonderheiten
Diamant	6 GPa	$> 1700^{\circ}\text{C}$	
Kubisches Bornitrid	$5 - 6\text{ GPa}$	$> 1400^{\circ}\text{C}$	
Kubisches Bornitrid	$1,8\text{ GPa}$	$> 700^{\circ}\text{C}$	in flüssigem Hydrazin
Siliciumnitrid	15 GPa	$> 1650^{\circ}\text{C}$	
Siliciumcarbid		2100°C	
Korund		$> 1000^{\circ}\text{C}$	

2.5 Grundlegendes zu Verschleißvorgängen

2.5.1 Tribologie

Reibung, Schmierung und Verschleiß sind Teilgebiete der Tribologie. Diese ist die Wissenschaft von aufeinander wirkenden Oberflächen, die sich in Relativbewegung zueinander befinden. Dabei werden Grenzflächenwechselwirkungen und die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt- und Relativbewegung der Oberflä-

che eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers beschrieben, DIN 50232 [30]. Im Zusammenhang mit der Tribologie sind besonders Angaben zum Beanspruchungskollektiv, zur Struktur des tribologischen Systems, zu auftretenden Energieverluste und zum Verschleiß wichtig. Die Beanspruchung einer Oberfläche durch Reibungsvorgänge wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet. Darunter ist die Gesamtheit der von außen auf das tribologische System wirkenden Beanspruchungsgrößen zu verstehen. Zudem bestehen Wechselwirkungen eines tribologischen Systems zu verschiedenen Fachgebieten. So muss zum Beispiel bei der Konstruktion, Instandhaltung oder sogar beim Qualitätsmanagement auf tribologische Vorgänge geachtet werden. Die tribologischen Vorgänge werden in der Triboforschung qualitativ hinsichtlich Art, Form und Ursache, und quantitativ hinsichtlich messbarer Größen untersucht [30]. In der Tribologie wird zwischen Tribophysik und Tribochemie unterschieden, die jeweils die entsprechenden physikalischen und chemischen Erscheinungen betrachten.

2.5.2 Verschleiß

Der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers wird als Verschleiß bezeichnet. Dieser Materialverlust wird durch mechanische Ursachen, z. B. den Kontakt und die Relativbewegung zwischen zwei Körpern unter Einfluss von Kräften, hervorgerufen. Hierbei können die Relativbewegungen zwischen festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper stattfinden, nach DIN 50320 (Norm wurde 1997 zurückgezogen) [28]. Verschleiß und Reibung sind komplexe Vorgänge, an denen meist verschiedene tribophysikalische und tribochemische Erscheinungen beteiligt sind. Je nach Tribosystem unterscheidet man nach der tribologischen Beanspruchung, den beteiligten Stoffen oder den Wechselwirkungen. Bei der Bewegungsform oder auch tribologischen Beanspruchung gibt es Gleit-, Wälz-, Schwingungs- oder Prallverschleiß. Bei den beteiligten Stoffen kann eine Unterscheidung zwischen Korngleit-, Festkörper-, Partikelgleit-, Strahlverschleiß und Flüssigkeitserosion getroffen werden. Die Verschleißarten werden nach Wechselwirkungen bzw. Mechanismen (Furchungs- oder Abrasivverschleiß, Ermüdungs-, Tribooxidationsverschleiß) eingeteilt, wenn die Verschleißerscheinungsformen eindeutig auf einen vorherrschenden Mechanismus hinweisen. Unterschiedliche Reibungszustände, in Abhängigkeit vom Bewegungszustand z. B. Haft- oder Bewegungsreibung, verursachen ein differenziertes Verschleißbild. Additional kann der Reibungszustand in Abhängigkeit vom Aggregatzustand der beteiligten Stoffbereiche weiter unterteilt werden.

Am bekanntesten ist die Festkörperreibung, dazu kommen noch innere Reibungszustände wie die Flüssigkeits- und Gasreibung. Es kann auch zu einer Mischreibung kommen, welche jede Mischform der Reibungszustände beschreibt, allerdings primär für Festkörper- und Flüssigkeitsreibung genutzt wird [30]. Die Unterteilung nach dem

Reibungszustand gliedert nur einen Teil des Verschleißgebietes und dient zum besseren Verständnis der Verschleißvorgänge. Da solche Verschleißsysteme durch unterschiedliche Randbedingungen bestimmt werden, Lager beispielsweise anders als Mühlen, ist eine weitere Differenzierung zu treffen. Hierbei können die Grenzen des Systems als offen oder geschlossen definiert sein. Wie in Abb. 2.21 wird ein tribologisches System von einer Vielzahl von Parametern bestimmt. Die Reibung und mit ihr der Verschleiß sind als Verlustgrößen einzustufen.

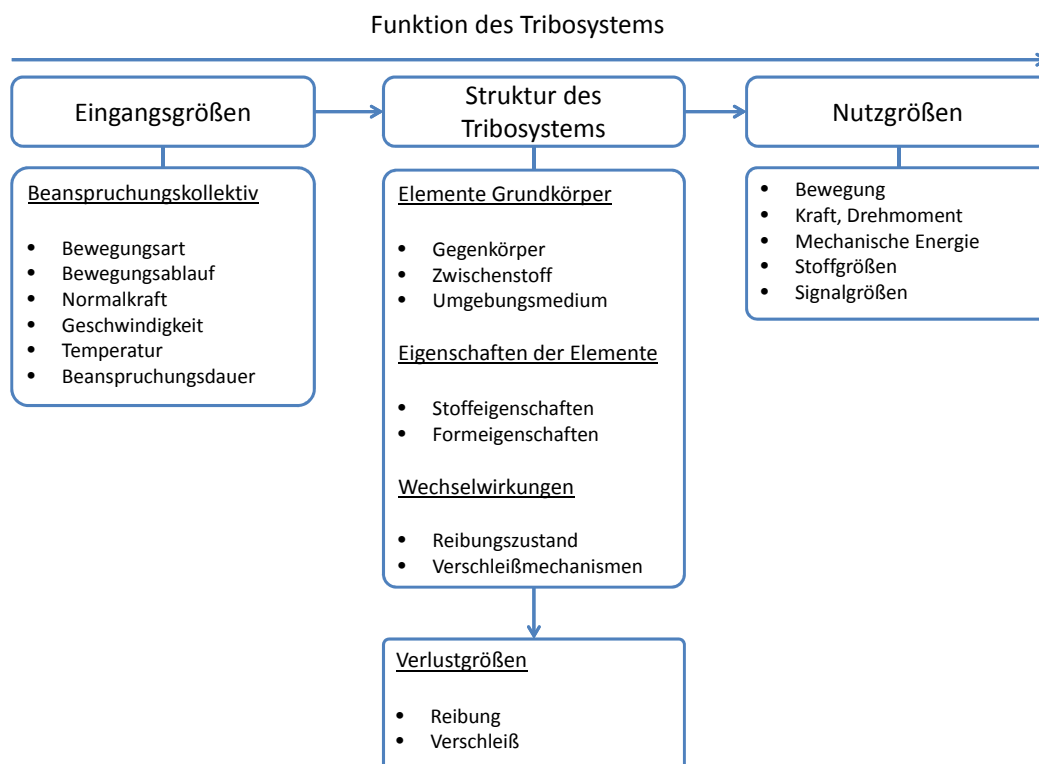


Abb. 2.21: Schema der Einflussgrößen in einem Tribosystem nach CZICHOS [20] und DUBBEL [37]

Um eine Aussage über den zu erwartenden Verschleiß zu geben, ist des Weiteren die Kenntnis der schon erfolgten Beanspruchungsdauer von Vorteil. Als Grund kann das Einlaufverhalten von Verschleiß behafteten Systemen angeführt werden. Das heißt, dass sich nach einer Einlaufzeit mit erhöhtem Verschleiß ein linearer Zusammenhang von Beanspruchung und Verschleiß einstellt. Vor Ausfall des Systems steigt der Materialabtrag wieder überproportional an und signalisiert somit, dass der Beharrungszustand verlassen wurde.

Auf ein Tribosystem wirken äußere Einflüsse wie z. B. die Bewegungsformen, der zeitliche Bewegungsablauf und die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter. Diese Einwirkungen werden Beanspruchungskollektiv genannt. Je nach Beanspruchung kommt es zu unterschiedlichen Verschleißerscheinungsformen im System. Um Materialien und Oberflächen vor Beschädigung schützen zu können, müssen zunächst die Verschleißmechanismen, welche als energetische und stoffliche Wechselwirkungen

in einem Verschleißsystem auftreten, verstanden werden. Verschleißmechanismen sind die verursachenden physikalischen und chemischen Prozesse. Sie sind das Ergebnis der Einwirkungen vom Beanspruchungskollektiv auf die Elemente des tribologischen Systems. Dabei findet Unterscheidung in vier Hauptgruppen Anwendung.

- Adhäsion (Bildung und Trennung atomarer Bindungen)
- Abrasion (Ritzung und Mikrozerspanung)
- tribochemische Reaktion (chem. Reaktion infolge Aktivierung)
- Oberflächenzerrüttung (Rissbildung infolge wechselnder Beanspruchung)

Adhäsion ist die Ausbildung von Grenzflächen-Haftverbindungen, z. B. Kaltverschweißungen. Der Verschleiß tritt durch die nachfolgende Trennung der Haftverbindung außerhalb der ursprünglichen Grenzflächen auf.

Unter Abrasion versteht man den Materialabtrag durch furchende und ritzende Beanspruchung. Abrasiver Verschleiß ist eine Zerspanung im Mikrobereich.

Oberflächenzerrüttung bezeichnet Ermüdung und Rissbildung in Oberflächenbereichen, die zu Materialtrennungen und -abtragungen führen. Tribochemische Reaktionen entstehen durch tribologische Beanspruchung aktivierte, bzw. geförderte chemische Reaktionen zwischen Grund- und Gegenkörper. Diese führen zu Reaktionsschichten, die häufig eine andere Abtragsrate besitzen als das Grundmaterial.

2.5.3 Beschreibung von Verschleißvorgängen

Theoretische Betrachtung

Die Beschreibung von Verschleißvorgängen und tribologischen Vorgängen erfolgt mit Hilfe eines tribologischen Systems, auch Tribosystem genannt. In Abb. 2.22 ist ein Tribosystem mit seinen Bestandteilen dargestellt.

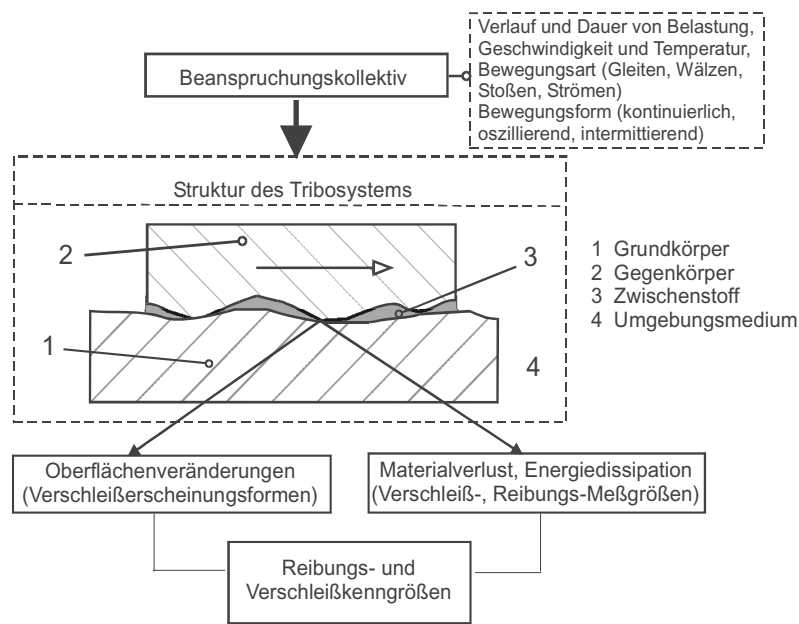


Abb. 2.22: Schema eines tribologischen Systems [11]

Zur theoretischen Betrachtung des Verschleißes werden alle stofflichen Komponenten, die an einer tribologischen Beanspruchung beteiligt sind und deren Eigenschaften in einem Tribosystem aufgelistet. Die stofflichen Komponenten beschreiben mit ihren Eigenschaften und Wechselwirkungen die Struktur des Tribosystems. Zur Systemstruktur gehören der Grund- und Gegenkörper, der Zwischenstoff und das Umgebungsmedium. In der Systemstruktur sind alle physikalischen, chemischen Eigenschaften und Werkstoffkenngrößen der beteiligten Körper und Medien zusammengefasst. Die Beanspruchungsgrößen ergeben das Beanspruchungskollektiv, welches durch die Kinetik des Vorgangs (Bewegungsform und zeitlicher Bewegungsablauf) und durch die technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter abgebildet wird. Die auftretenden Bewegungsformen lassen sich auf vier elementare Bewegungsformen oder deren Überlagerungen zurückführen: gleiten, rollen, stoßen bzw. prallen und strömen. Der Bewegungsablauf kann kontinuierlich, oszillierend oder intermittierend sein. Die technisch physikalischen Beanspruchungsparameter werden in Normalkraft, Beanspruchungsgeschwindigkeit, Temperatur und Beanspruchungsdauer unterteilt. Bei Kenntnis der Normalkraft und der geometrischen Berührungsfläche zwischen Grund- und Gegenkörper lässt sich die mittlere Flächenpressung errechnen. Mittels der Beanspruchungsdauer und der Geschwindigkeit lässt sich der zurückgelegte Weg während der Beanspruchung einschätzen.

Verschleißerscheinungsformen

Der beim Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Struktur des Tribosystems auftretende Verschleiß wird durch Verschleißkenngrößen beschrieben. Die Verschleiß-

kenngrößen sind abhängig vom Beanspruchungskollektiv und der Struktur des Tribosystems. Sie setzen sich aus den Verschleißerscheinungsformen und den Messgrößen bezüglich des Verschleißes zusammen. Unter Verschleißerscheinungsformen werden die sich durch Verschleiß ergebenden Veränderungen der Oberflächen eines Körpers und die Art und Form der entstandenen Verschleißpartikel bezeichnet. In Tab. 2.7 sind zu den vier Hauptverschleißmechanismen jeweils typische Verschleißerscheinungsformen aufgelistet.

Tab. 2.7: Typische Verschleißerscheinungsformen durch die Hauptverschleißmechanismen

Verschleißmechanismus	Verschleißerscheinungsformen
Adhäsion	Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag
Abrasion	Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
Oberflächenzerrüttung	Risse, Grübchen
Tribochemische Reaktionen	Reaktionsprodukte (Schichten, Partikel)

Verschleißmessgrößen kennzeichnen Änderungen der Gestalt oder Masse eines Körpers durch Verschleißvorgänge. Man unterscheidet direkten, bezogenen und indirekten Verschleißmessgrößen [29]. Direkte Messgrößen geben Gestalts- und Masseänderungen der verschleißenden Körper an. Die bezogenen Messgrößen werden aus den direkten abgeleitet. Dazu werden die direkten Messgrößen ins Verhältnis mit der Beanspruchungsdauer, dem Beanspruchungsweg, dem Durchsatz oder gegebenenfalls auch anderen geeigneten Größen bezogen. Indirekte Verschleißmessgrößen geben im Allgemeinen die Dauer an, in der ein verschleißendes Bauteil seine Funktionsfähigkeit verliert.

Verschleißprüfungen

Die Kontrolle von Verschleißerscheinungen an Bauteilen wird mit unterschiedlichen Hintergründen durchgeführt. Die Ziele solcher Untersuchungen können sein:

- Optimierung von Bauteilen zum Erreichen einer vorgegebenen, verschleißbedingten Gebrauchsdauer
- Bestimmung verschleißbedingter Einflüsse auf die Gesamtfunktion von Maschinen
- Optimieren von Bauteilen zur Erreichung einer vorgegebenen Funktion
- Überwachung der verschleißabhängigen Funktionsfähigkeit von Maschinen
- Vorauswahl von Werkstoffen und Schmierstoffen für praktische Anwendungsfälle
- Qualitätskontrolle von Werkstoffen und Schmierstoffen
- Verschleißforschung, mechanismenorientierte Verschleißprüfung
- Schadensanalyse
- Diagnose von Betriebszuständen
- Sammlung von Daten für die Instandhaltung

Für die Prüfung von Verschleißerscheinungen sind unterschiedliche Kategorien, welche sich in Umfang und Praxisnähe unterscheiden, möglich. Wie in Tab. 2.8 aufgelistet, ist zu erkennen, dass die Kategorie Aufschluss über den Grad der Vereinfachung bei der Versuchsgestaltung gibt.

Tab. 2.8: Typische Verschleißerscheinungsformen durch die Hauptverschleißmechanismen [11]

Kategorie	Bezeichnung
I	Betriebsversuche
II	Prüfstandsversuche mit kompletter Maschine
III	Prüfstandsversuche mit Aggregat oder Baugruppe
IV	Versuch mit unverändertem Bauteil oder verkleinertem Aggregat
V	Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern
VI	Modellversuch mit einfachen Probekörpern

Als Ziel von Versuchsreihen für Materialien im Kontakt mit Festgestein sollte hierbei ein vertretbarer Aufwand mit reproduzierbaren und praxisnahen Ergebnissen stehen.

3 Bohrprozess und Zerspanung

3.1 Einordnung des Bohrens

Um einen zylindrischen Hohlraum, ein Bohrloch, im Gestein herzustellen, ist dieses im gewünschten Volumenbereich zu zerstören. Dies kann nach SCHWATE [87] mechanisch bzw. mit einem nicht mechanischen Verfahren erfolgen. Die Form des Hohlraums ist vom Werkzeug, dem zu bohrenden Gestein und von den Bohrparametern abhängig. Eine erste Unterteilung der mechanischen Gesteinszerstörung kann nach den Zerstörungsprinzipien der Wirkelemente der Werkzeuge getroffen werden [98]:

- spaltend
- kerbend
- drückend
- zertrümmernd
- schneidend
- spanend
- schabend
- schleifend

Aus maschinentechnischer Sicht ist das Bohren in der Hauptgruppe des Trennens nach DIN 8580 [32] einzuordnen. Unter dem Begriff Trennen ist nach DUBBEL [37] zu verstehen, dass der Stoffzusammenhalt örtlich aufgehoben wird. Das Bohren wiederum kann aus maschinenbaulicher Sicht in Spanen mit geometrisch bestimmten und geometrisch unbestimmten Schneiden unterteilt werden. Die allgemein gültige Unterteilung der mechanischen Gesteinsbohrverfahren gliedert sich in drei Gruppen nach DIN 20301 [26], das schlagende, drehende und kombinierte Bohren. Diese Unterteilung ist unter der Berücksichtigung der Art der Bohrung (Voll-, Kern- oder Erweiterungsbohrung) im Gestein zu treffen. Die Festlegung des eingesetzten Bohrverfahrens wirkt sich auf die Formgebung der zu verwendeten Werkzeuge aus. Diese haben im ersten Schritt des Bohrvorgangs die Aufgabe, durch ihre Schneidelemente Gestein aus dem Verbund zu lösen. Hierbei wird das bestehende Gestein in Form von Kratern, Rillen oder Furchen zerstört und anschließend gelöst [98]. Ziel ist es, mit möglichst geringem Energieeinsatz die aufzufahrenden Querschnitte zeitoptimiert und unter größtmöglicher Sicherheit für Personal und Umwelt herzustellen. Der nächste Teilschritt ist das Abfordern des gelösten Bohrkleins. Dies erfolgt durch den Einsatz von Spülungen, kann jedoch auch rein mechanisch vonstatten gehen. Die Stützung des Bohrloches nach dem Löse- und

Transportvorgang ist als wichtiger dritter Prozessschritt zu nennen.

3.2 Die Bohrbarkeit von Festgestein

3.2.1 Bewertung von Bohrbarkeiten und Werkzeugverschleiß

Als Fragestellung in der Bohrtechnik steht die einzusetzende Maschinenteknik in Abhängigkeit der Gesteinseigenschaften im Vordergrund. Um die Auswahl geeigneter Verfahren zu erleichtern, ist das Ziel einer Bewertung, die Fassung der Bohrbarkeit in quantifizierbare Größen. Hinter deren Einteilung, z. B. für Festgesteine, wie auch hinter dem Lösewiderstand von Lockergesteinen, stehen wirtschaftliche Aspekte. Die genaue Voraussage der zu erreichenden Bohrgeschwindigkeit kann z. B. im Sprengvortrieb entscheidend für die Einschätzung der täglichen Abschlüsse sein. Im Wesentlichen lässt sich die Bohrbarkeit nach MAIDL [60] durch die ein- und mehrparametrische Definition unterscheiden. Einparametrisch bedeutet, dass der Widerstand des Gesteins gegen das Eindringen der Schneide für eine Bohrung von einem Meter nach der Zeit beurteilt wird. Als mehrparametrische Einteilung kann die Einbeziehung von Werkzeugkenngrößen, wie z. B. dem Meißelverschleiß, verstanden werden. Wie durch LATHAN [53] und PLINNINGER [71] dargelegt, existieren Zusammenstellungen über die Bohrbarkeit, die sich auf den Verbrauch von Bohrkronen in Bezug auf die erbohrten Meter beziehen. Auch die Einteilung nach PROTODJAKONOV kann als Klassifizierung verwendet werden, (Tab. 3.1). Hierbei kann bei Kenntnis des Bohrungsdurchmessers nach KÜHN [49] die erforderliche Vorschubkraft nach den folgenden drei Gleichungen für eine vollflächige Bohrung in Abhängigkeit des Bohrverfahrens approximiert werden.

$$\text{Schlagendes Bohren } F_v \approx 5 \cdot f \cdot d_B \quad (3.1)$$

$$\text{Drehschlagendes Bohren } F_v \approx (10 \dots 20) \cdot f \cdot d_B \quad (3.2)$$

$$\text{Drehendes Bohren } F_v \approx (25 \dots 35) \cdot f \cdot d_B \quad (3.3)$$

Dabei gilt:

F_v	Vorschubkraft in kN
f	Festigkeitskoeffizient nach PROTODJAKONOV
d_B	Bohrungsdurchmesser in m

Die Ergebnisse bezogen sich auf das Herstellen von Sprenglochbohrlöchern, bei denen vorzugsweise Bohrhämmer zum Einsatz kommen.

Tab. 3.1: Klassifizierung nach PROTODJAKONOV [53]

Festigkeitsgrad Kategorie des Gesteins		Gesteine	Festigkeitskoeffizient	Druckfestigkeit in kp/cm^2 N/mm^2
I	in höchstem Grade feste Gesteine	festeste, dichteste und zäheste Quarze und Basalte, außerordentlich feste andere Gesteine	20	2000 196,2
II	sehr feste Gesteine	sehr feste granitische Gesteine, Quarzporphyr, sehr fester Granit, Kieselschiefer, weniger feste Quarzite, festeste Sand- und Kalksteine	15	1500 147,15
III	feste Gesteine	Granit (dicht) und granitische Gesteine, sehr feste Sandsteine und Kalksteine, Quarzerzgänge, festes Konglomerat, sehr feste Eisenerze	10	1000 98,1
IIIa	wie III	Kalksteine (fest), nicht fester Granit, feste Sandsteine, fester Marmor, Dolomit, Kiese	8	800 78,48
IV	ziemlich feste Gesteine	gewöhnlicher Sandstein, Eisenerze	6	600 58,86
IVa	wie IV	sandige Schiefer, schiefrige Sandsteine	5	500 49,05
V	mittelfeste Gesteine	fester Tonschiefer, nicht fester Sandstein und Kalkstein, welches Konglomerat	4	400 39,24
Va	wie V	verschiedene Schiefer (nicht fest), fester Mergel	3	300 29,43
VI	ziemlich weiche Gesteine	weicher Schiefer, sehr weicher Kalkstein, Kreide, Steinsalz, Gips, gefrorener Boden, Anthrazit, zerstörter Sandstein, zementierter Kiesel- und Grobsand, steiniger Boden	2	200 19,62
VIa	wie VI	Schotterboden, zerstörter Schiefer, festgebackene Kiesel und Schotter, feste Steinkohle, verhärteter Ton	1,5	-
VII	weiche Gesteine	Ton (fest), weiche Steinkohle, fester Anschwemmungsboden, toniger Boden	1	-

Um eine Einteilung nach der Bohrbarkeit zu treffen, wurden von SIEVERS [89] Untersuchungen unternommen, die sich auf vergleichende Probebohrungen stützen. Der Zusammenhang zwischen Bohrleistungen und Gesteinswiderstand wird darin durch die aktive Bohrbarkeit beschrieben. Des Weiteren wird die passive Bohrbarkeit durch die Verschleiß beeinflussenden Parameter des Gesteins bestimmt. Als ein Anhaltspunkt für den Verschleißfaktor wird der äquivalente Quarzgehalt des Gesteins angegeben. Der Aspekt der Bohrlochsohlenreinigung wird ebenfalls angesprochen. Nach SCHIMAZEK [82] kann ebenfalls anhand der Anteile von Hartmineralien die Bohrbarkeit in Bezug auf das zu erwartende Verschleißverhalten eingeschätzt werden. Als Datenbasis dienten Versuchsreihen mit unterschiedlichen Gesteinen, welche von einer Meißelspitze unter konstantem Andruck überfahren wurden. Als Ergebnis konnten je nach Gehalt an schleißenden Materialien im Gestein unterschiedliche Verschleißwerte an den Meißelspitzen und somit Massenverluste ermittelt werden, siehe Abb. 3.1.

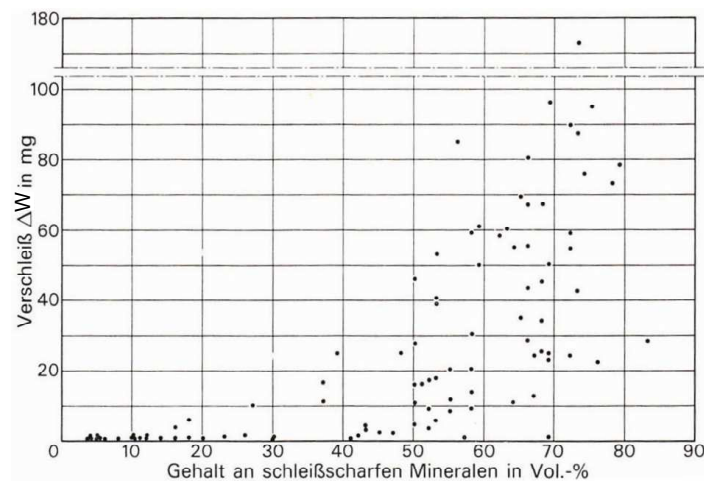


Abb. 3.1: Zusammenhang des Verschleißkoeffizienten nach SCHIMAZEK und des Materialverlustes [82]

Aus der bestehenden Datenbasis ist es möglich, den Verschleißwert F zu entwickeln, welcher sich proportional zu dem entstehenden Materialverlust verhält. Hierfür wird die Zugfestigkeit, der äquivalente Quarzanteil, welcher für den Verschleiß am Werkzeug verantwortlich ist und dessen mittlerer Korndurchmesser zur Vorhersage der Verschleißfestigkeit nach Formel 3.4 herangezogen (abgewandelt nach SCHWATE und GENSKE [87, 44]). Der äquivalente Quarzanteil kann über die Schleifhärte nach ROSSIVAL mit den dazugehörigen prozentualen Angaben bestimmt werden, siehe THURO [92].

$$f_V = V_Q \cdot d_Q \cdot \sigma_Z \quad (3.4)$$

Mit:

- f_V Verschleißkoeffizient in N/mm
- V_Q äquivalenter Quarzanteil (nach Modalanalyse)
- d_Q mittlerer Korndurchmesser Quarzanteil in mm
- σ_Z Zugfestigkeit des Gesteins in N/mm^2

Als Ergebnis erhält man nach SCHIMAZEK [82] einen Verschleißkoeffizienten, mit dem es möglich ist, bei Kenntnis der zu bohrenden Strecke den Materialabtrag vorherzusagen. Er stellt hierbei eine lineare Verbindung zur Abnutzung in mm am Versuchskörper her.

Tab. 3.2: Klassifikation von Abrasivitäten für Gesteinsmaterial nach ARTHUR [10]

Abrasivität	CERCHAR Verschleißmarken in <i>mm</i>	Verschleißkoeffizient nach SCHIMAZEK in <i>N/mm</i>
extrem	> 0,40	11
sehr	0,20 - 0,40	5 - 11
moderat	0,10 - 0,20	2 - 5
leicht	0,05 - 0,10	0,5 - 2
nicht	< 0,05	0,5

Durch vergleichende Versuche ist es nach ARTHUR [10] ebenfalls möglich einen Zusammenhang zu anderen Prüfverfahren herzustellen, siehe Tab. 3.2 und diese mit dem Koeffizienten nach SCHIMAZEK zu koppeln (Abb. 3.2).

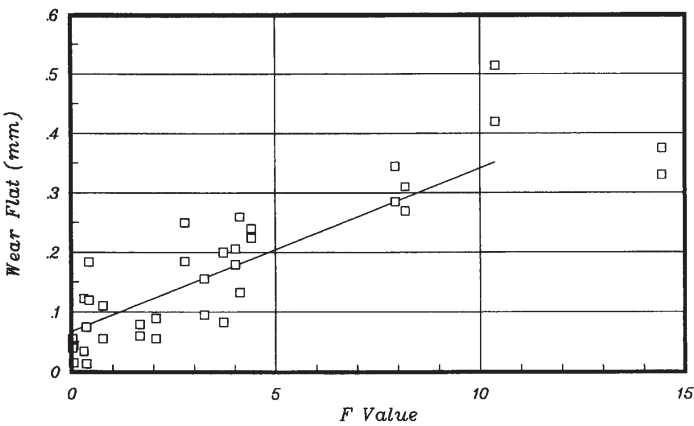


Abb. 3.2: Zusammenhang des Verschleißkoeffizienten nach SCHIMAZEK und der entstehenden Verschleißfläche nach dem CERCHAR Abrasivitätstest nach ARTHUR [10]

3.2.2 Maschinentechnische Einflussgrößen auf den Schnittvorgang

Die Beeinflussung der Schnittkraft geschieht nach DEGNER [22] im Wesentlichen durch zehn Größen (Tab. 3.3).

Tab. 3.3: Einflussgrößen auf den Schnittvorgang [22]

Werkstoff	Einstellwinkel
Vorschub	Schnittgeschwindigkeit
Schnitttiefe	Schneidstoff
Spanungsverhältnis	Kühlung und Schmierung
Spanwinkel	Schneidenverschleiß

Diese geometrischen Spezifika und Betriebsparameter des Bohrvorganges spiegeln sich in der Beanspruchung der Schneide wieder. Die Definition des Schneidstoffes kann über die Zusammensetzung oder den Gefügebau erfolgen. Härte sowie die Festigkeit sind herstellersistenspezifische Größen, die sich nicht proportional auf die Schnittkraft auswirken. Somit ist die Festigkeit nicht als alles bestimmende Größe für die Kräfte an der

Schneide zu sehen. Die Einstellparameter beim Bohrvorgang wirken sich direkt auf die spezifische Schnittkraft aus, wie von DEGNER [22] dargestellt. Eine Größe, die in der Tiefbohrtechnik weniger bedeutend ist, stellt das Spanungsverhältnis dar. Es ist das Verhältnis aus Schnitttiefe und Vorschub und hat Auswirkungen auf die Schnittflächen nach dem Spanvorgang. Da im Maschinenbau nach der Bearbeitung Rautiefen einzuhalten sind, kann anhand des Spanungsverhältnisses unterschieden werden, ob es sich z. B. um Schruppen oder Schlichten handelt. Die Form der Schneidkante ist durch Winkel und Verrundungsradius definiert. Schneiden mit großem Schneid- beziehungsweise Keilwinkel werden für die Bearbeitung von harten Werkstoffen mit höheren Festigkeiten eingesetzt, während Schneiden mit kleinerem Winkel bei weicheren Werkstoffen angewendet werden. Gleiches gilt für die Verrundungsradien an den Schneidenecken, die ganz maßgeblich die Oberflächenrauigkeit und die Maßhaltigkeit der zu bearbeitenden Oberfläche bestimmen. Auch die Ausbildung des Spans hängt davon in starkem Maße ab. Diese wirkt sich auf den Werkzeugverschleiß und somit auf die Kosten des Zerspanungsvorganges aus.

3.3 Drehende Gesteinsbohrverfahren

3.3.1 Spanendes Bohren

In der Gesteinsbohrtechnik lässt sich das drehende Bohren in die Untergruppe spanendes und rollendes Bohren unterteilen [26]. Des Weiteren ist bei ersterem eine Unterscheidung zwischen feinspanendem und grobspanendem Bohren möglich. Beispielsweise ist das Bohren mit imprägnierten Diamantwerkzeugen dem feinspanenden und die Zerspanung mit klassischen polykristallinen Diamantmeißeln dem grobspanenden Bohren zuzuordnen. Trotz dieser Unterscheidung ist der eigentliche Zerspanvorgang durch ein einheitliches Modell (Abb. 3.3) gekennzeichnet.

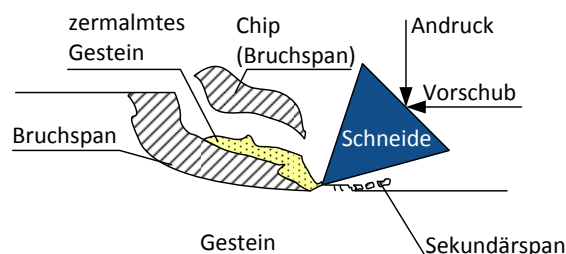


Abb. 3.3: Modell des spanenden Gesteinslösevorganges nach REICHENBÄCHER [80]

Aus diesem Zusammenwirken der Schneide und dem zu zerstörenden Gestein lässt sich der eigentliche Schneidvorgang in folgende Phasen einteilen.

1. Auflaufen der Schneide auf eine Materialkante.
2. Beim Erreichen einer ausreichenden Andruckkraft dringen die Schneidelemente in das Gestein ein.
3. An der Spitze der Schneide bilden sich hohe Kräfte, die dazu führen, dass Gesteinspartikel zermalmt werden. Dabei erfolgt ein Herauslösen des Gesteinskorns aus dem festen Verband.
4. Anwachsen der Kontaktfläche und Abbau der Spannungspitzen.
5. Stoppen der Vorwärtsbewegung und somit Anwachsen der Schnittkraft. Hieraus folgt eine Speicherung der eingebrachten Arbeit als potentielle Energie (E_{pot}) im Werkzeug.
6. Bei genügend großer Kraft wird das Gesteinselement aus dem Verband gerissen und es wandelt sich potentielle in kinetische Energie ($E_{pot} \rightarrow E_{kin}$) um, dabei wird ein Gesteinschip abgesprengt und der Vorgang beginnt von Neuem.

Als Resultat ergeben sich die charakteristischen Schnittkraftverläufe in einem zwei-dimensionalen Modell, Abb. 3.4.

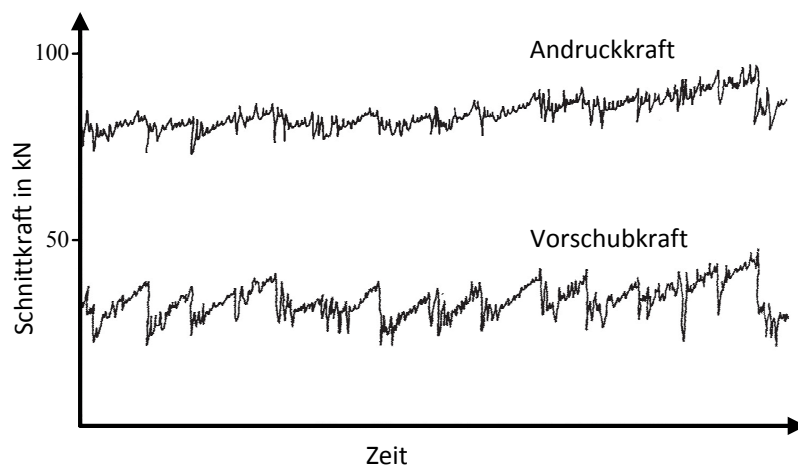


Abb. 3.4: Schnittkraftdiagramm beim Zerspanen eines Witwatersrand-Quarzites nach WAGNER [94]

Die fluktuierenden Kraftverläufe spiegeln die einzelnen Phasen des Schnittvorganges wieder. Als Basiskriterium liegt hierfür der Verlauf entlang der Spannungs-Dehnungs-Kurve vor (siehe Abb. 2.5 auf Seite 25). Diese Entwicklung der Spannungen und der Verschiebung endet bei spröden Gesteinen beim Erreichen der Elastizitätsgrenze und folgend kommt es zum Versagen. Somit ist ein Wechsel zwischen Spannungsaufbau (Schnittkrafterhöhung) und Entlastung (Lösen von Material) während des Spanvorganges zu verzeichnen.

Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide

Von einer Anfangsgeometrie werden durch die Schneiden eines Werkzeugs Stoffteile in Form von Spänen mechanisch getrennt. Beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide sind Schneidenanzahl, Form der Schneidkeile und Lage der Schneide zum Werkstück bekannt und beschreibbar.

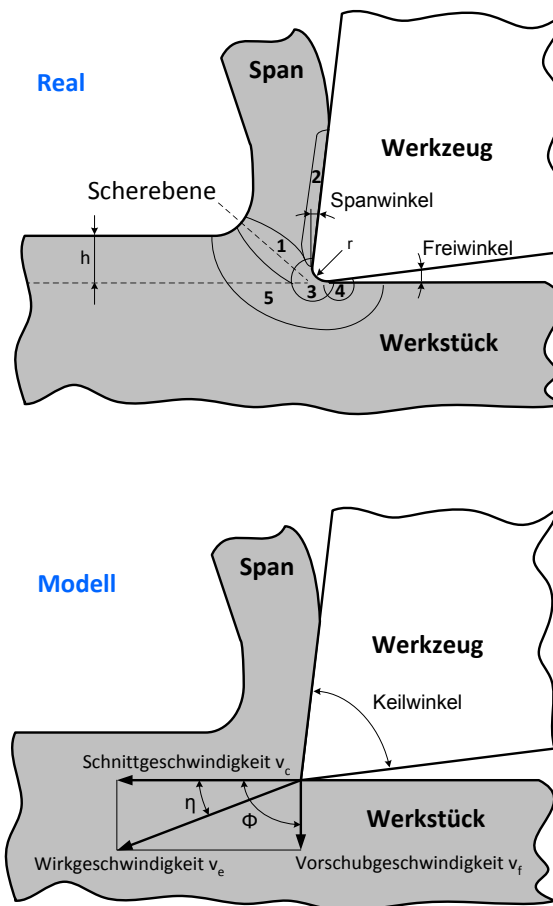


Abb. 3.5: Modellbildung Spanabtrag nach DUBBEL [37]

Folgende Bewegungen sind zu unterscheiden:

- Schnittbewegung mit der Schnittgeschwindigkeit v_c ,
- Vorschubbewegung mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f und
- Wirkbewegung mit der Wirkgeschwindigkeit v_e .

Des Weiteren wird der Winkel zwischen Vorschub und Schnitttrichtungsvektor als Vorschubrichtungswinkel ϕ und der Winkel zwischen Wirk- und Schnitttrichtung als η bezeichnet. Der Zusammenhang dieser Größen ist in Gleichung 3.5 verdeutlicht.

$$\tan \eta = \frac{\sin \phi}{\frac{v_c}{v_f} + \cos \phi} \quad (3.5)$$

Um den Zerspanungsvorgang zu charakterisieren, kann dieser durch die ebene Formänderung (Orthogonalprozess) beschrieben werden. Dabei wird der Werkstoff durch das Eindringen des Schneidkeiles plastisch verformt. Somit lässt sich eine Unterscheidung in fünf Zonen treffen (Abb. 3.5) die durch Tab. 3.4 beschrieben werden.

Tab. 3.4: Wirkmechanismen Spanentstehung nach Abb. 3.5

Zone	Bezeichnung	Wirkmechanismus
1	primäre Scherzone	Entstehung des Spans
2, 4	sekundäre Scherzone	Auftreten von Reibkräften, die Werkstoffschichten plastisch verformen
5	Verformungsvorlaufzone	elastische und plastische Verformung aufgrund der Spanentstehung
3	Stau und Trennzone	durch hohe Druckspannungen wird der Werkstoff verformt und getrennt

Um einen Span abzuheben, muss die vollständige Umsetzung der zugeführten Schnittenergie E_c erfolgen. Diese Energiekomponente errechnet sich aus der nachstehenden Beziehung.

$$E_c = F_c \cdot l_c \quad (3.6)$$

Hierbei ist l_c der zurückgelegte Weg entlang des Schnittkraftvektors F_c . Die Schnittenergie setzt sich aus verschiedenen Teilkomponenten zusammen, vergl. Tab. 3.5.

Tab. 3.5: Zusammensetzung der Schnittenergie

Energieart	Bezeichnung
Umform- und Scherenergie	E_ϕ
Reibenergie an der Spanfläche	E_γ
Reibenergie an der Freifläche	E_α
Energie zur Bildung neuer Oberflächen	E_T
kinetische Energie zur Umlenkung des Spanes	E_M

Um aus der Kenntnis der Zerspanenergie eine Bewertung des Schnittvorganges vorzunehmen, kann diese als bezogene Größe dargestellt werden. Die spezifische Energie des Schnittvorganges ist dann wie folgt definiert.

$$e_{spez} = \frac{E_c}{V_c} \quad (3.7)$$

Das zerspante Volumen V_c kann aus geometrischen Zusammenhängen gewonnen werden. Um die spezifische Energie in eine spezifische Schnittkraft k_s zu überführen, ist

eine geometrische Betrachtung des Schnittvorganges nach Abb. 3.5 erforderlich.

$$k_s = \frac{F_c}{A_s} = \frac{F_c}{h \cdot b} \quad (3.8)$$

Dabei wird der abgetragene Spanungsquerschnitt durch die Spandicke h und die Spannungsbreite b gekennzeichnet. Mit Hilfe der zugeführten Schnittleistung P_c und dem Zeitspanvolumen Q_c kann die Transformation nach Gleichung 3.9 erfolgen.

$$e_{spez} = \frac{E_c}{V_c} = \frac{P_c}{Q_c} = \frac{F_c \cdot v_c}{A_s \cdot v_c} = k_s \quad (3.9)$$

Die eingeleitete Energie in der Spanbildungszone wird zum größten Teil in Wärme umgewandelt, der Rest in Eigenspannungsenergie im Span. Hieraus folgt, dass es zu starken Temperaturanstiegen im Schneidkeil kommt. Die daraus entstehende thermische Beanspruchung der Schneide kommt zur mechanischen hinzu.

Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide

Das Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden gehört ebenfalls zur Hauptgruppe des Trennens [32]. Die Schneiden sind geometrisch nicht festgelegt und können z. B. aus unregelmäßig geformten Hartstoffkörpern gebildet werden. Eine weitere Unterscheidung zwischen gebundenem (Schleifscheiben) und ungebundenem Korn (Nutzung von Schleifpasten) erfolgt im Maschinenbau in Untergruppen. Die Hartstoffkörper bilden meist mehrere Schneiden. Die Schneidenwinkel werden mit statistischen Größen erfasst. Es treten große Kontakt- und Reibzonen zwischen dem Werkstoff (z. B. Gestein) und Werkzeug auf, da im Mittel die Spanwinkel stark negativ sind. Durch die kleinen Eindringtiefen der einzelnen Schneiden kommt es nicht nur zum Spanabtrag sondern auch zu elastischen Verformungen auf der zu zerstörenden Oberfläche. In Folge der negativen Spanwinkel kann von hohen Normalkräften ausgegangen werden. Weitere Einflussfaktoren auf den Zerspanvorgang sind nach DEGNER [22] die Körnung, Härte und die Bindung der Einzelkörner in der Matrix.

3.3.2 Rollendes Bohren

Bei diesem Verfahren erfolgt die Gesteinszerstörung durch kerbende und scherende Beanspruchung. Durch einen sehr hohen Andruck werden Kerben in das Gestein eingebracht. Im weiteren Verlauf kommt es durch die Scheidengeometrie, bzw. das Abrollen auf der Bohrlochsohle, zu einer Scherbeanspruchung im Gestein. Die zu durchlaufenden Phasen des Gesteinszerstörungsvorganges sind in Abb. 3.6 dargestellt.



Abb. 3.6: Gesteinszerstörungsprozess eines Rollenmeißelzahn nach LUY [58]

Der einzelne Vorgang der Zerstörung verläuft wie folgt:

- a, b) Elastische Deformation des Gesteins beim Aufbringen einer Last auf den Zahn.
- c) Entstehung einer Zone unter dem Zahn, die aus zermalmtem Gestein besteht.
- d) Wenn das pulverisierte Gestein keine Belastung mehr aufnehmen kann, erfolgt ein Übertragen der Kräfte auf das umliegende Gestein.
- e) Entstehung von Scherkräften, die zum Versagen des Gesteins führen.

Laut BELOHLAVEK [14] ist der Gesteinslösemechanismus nicht von der Zahnform abhängig und es bestehen auch keine Zusammenhänge mit den Eindringgeschwindigkeiten. Dem gegenüber steht nach Ansicht von PRINZ [74] die Abhängigkeit des Verformungsverhaltes von Druck, Temperatur, Werkstoffgeometrie und Belastungsgeschwindigkeit. Dies ergaben Untersuchungen der Abweichungen bei grundlegenden gesteinsmechanischen Untersuchungen.

3.4 Schlagendes Bohren

Bei schlagenden Verfahren werden Schlagimpulse auf die Werkzeugschneiden übertragen. Dadurch dringen diese in das Gestein ein und verursachen Kerben. Durch die Überwindung der Druckfestigkeit werden Gesteinssplitter abgesprengt. Die Gestaltung der Werkzeuge erfolgt für ein Eindringen als auch für das Aufbringen einer Scherspannung nach dem Eindringen in das Gestein (Abb. 3.7). Die Meißelform spielt eine starke Rolle bei der Zerstörung von Gestein. Je spitzer der Winkel der Schneidenecke ist, um so höher sind die zu erreichenden Spannungen. Somit kann der Meißel weiter eindringen und mehr Spannung (Keilwirkung) in das Gestein bringen. Je stumpfer der Meißel ist, um so unanfälliger ist er z. B. gegen abrasiven Verschleiß. Es erhöht sich jedoch die Pulverisierung des Gesteins unter der Schneide, was zu einer erhöhten Schaffung neuer Oberflächen und somit zu einer schlechteren Energiebilanz des Bohrvorganges führt. Physikalisch liegt dem schlagenden Bohren ein realer Stoßvorgang zu Grunde. Nach

NIU [68] kann demnach eine hohe gesteinszerstörende Wirkung durch eine Erhöhung der Einschlagenergie des Werkzeugs erreicht werden.

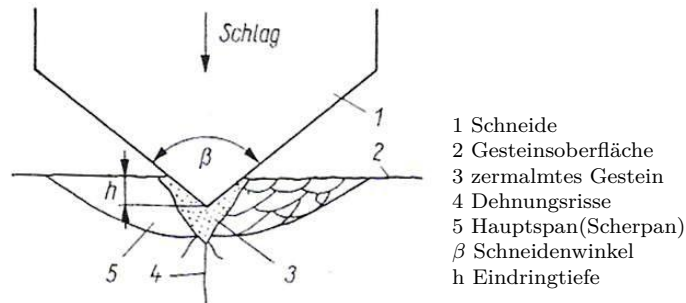


Abb. 3.7: Kraterbildung beim schlagenden Bohren nach ARNOLD [9]

Das größere gelöste Kratervolumen gegenüber einer statisch drückenden Zerstörung resultiert aus der Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit und dem sich einstellenden, spröderen Gesteinsverhalten [74].

Nach ANTONYUK [8] kann der eigentliche Stoßvorgang in eine Phase der Kompression und Ablösung unterteilt werden. Der eigentliche Stoß findet in einem sehr kleinen Zeitabschnitt statt ($\rightarrow 0$) und bedingt die Änderung des Bewegungs- und Spannungszustandes.

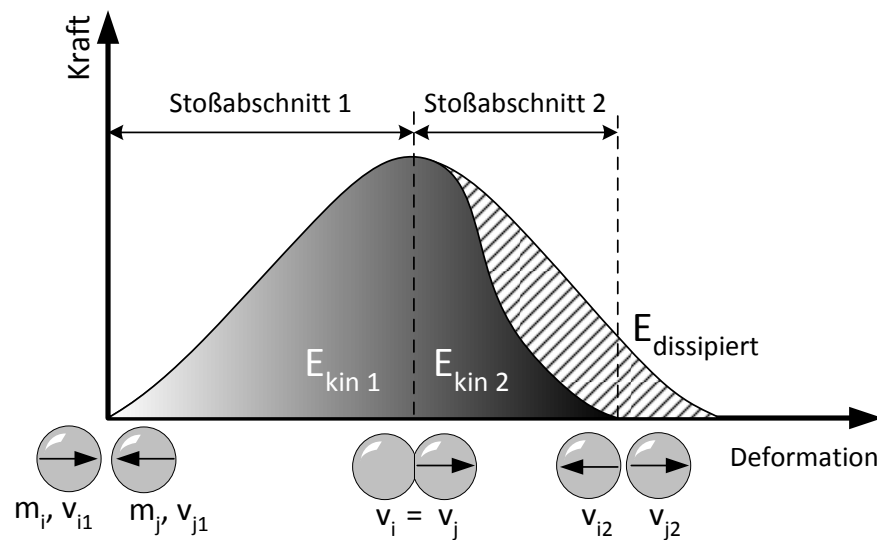


Abb. 3.8: Elastisch-plastischer Stoßvorgang nach ANTONYUK [8]

In Abb. 3.8 ist zu erkennen, dass beim realen Stoß ein Teil der eingetragenen kinetischen Energie ($E_{kin 1}$) dissipiert. Diese Energiedissipation ist mit Deformationen und der mechanischen Zerstörung des Gesteins sowie Reibungs- und Dämpfungsvorgängen zu erklären. Über die Relativgeschwindigkeiten der Stoßpartner vor und nach dem Stoß kann nach KNAPPSTEIN und ANTONYUK [52, 8] der eigentliche Vorgang genauer

spezifiziert werden. Dem schlagenden Bohren kann auf Basis von Energie- und Impulserhaltungssatz eine vollständige Beschreibbarkeit zu Grunde gelegt werden.

In der Praxis hat sich die Beschreibung der Energien durch die Geschwindigkeit der bewegten Teile als sinnvoll erwiesen. Um die Vorgänge an technischen Geräten weiter zu vereinfachen, werden meist Widerstände durch die umgebende Luft sowie geringe Reibungsverluste vernachlässigt. Aus den Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß kann der Restitutionskoeffizient, auch Stoßzahl k genannt, bestimmt werden, Formel (3.10). KNAPPSTEIN definiert das Verhältnis zwischen den Relativgeschwindigkeiten vor und nach dem Stoß. Bei einem vollkommenen elastischen Stoß beträgt demnach $k=1$ und im rein plastischen Fall $k=0$. Da es sich im Falle eines realen Stoßes um eine Mischform handelt und eine starke Abhängigkeit von den jeweiligen Materialien der Stoßpartner besteht, können die Werte zwischen 0,05 und 0,6 (Stahl, Gestein) angenommen werden.

$$k = \frac{v_{i2} - v_{j2}}{v_{j1} - v_{i1}} \quad (3.10)$$

Dabei sind:

k	Stoßzahl
v_{i1}, v_{j1}	Geschwindigkeiten der Körper i und j vor dem Stoß
v_{i2}, v_{j2}	Geschwindigkeiten der Körper i und j nach dem Stoß

Als weiterer Anhaltswert für die Effektivität eines Schlagvorganges kann der Schlagwirkungsgrad, welcher sich nach Formel (3.11) berechnet, angesehen werden. Als Basis dient die beim Stoßvorgang dissipierte Energie, welche ins Verhältnis zur kinetischen Schlagenergie gesetzt wird [52, 8].

$$\lambda_S = \frac{E_{S,dissipiert}}{E_{S,kin}} = 1 - k^2 \quad (3.11)$$

Dabei gilt:

λ_S	Schlagwirkungsgrad
$E_{S,dissipiert}$	dissipierte Energie während des Stoßvorganges, vgl. Abb. 3.8
$E_{S,kin}$	kinetische Schlagenergie
k	Stoßzahl

Um die gesamte Bohrlochsohle zu bearbeiten, muss der Bohrkopf zwischen zwei

Schlägen umgesetzt werden. In diesem Zeitraum des Umsetzens ist der Bohrkopf nicht in Kontakt mit der Bohrlochsohle, da er idealerweise durch den Rückprall von dieser abhebt. Die Schneidengeometrien können von Einfach- über Kreuz- bis hin zu X-Schneiden reichen, weiterhin sind Bohrköpfe mit Hartmetallinserts weit verbreitet und finden in der Praxis Anwendung (Abb. 3.9).

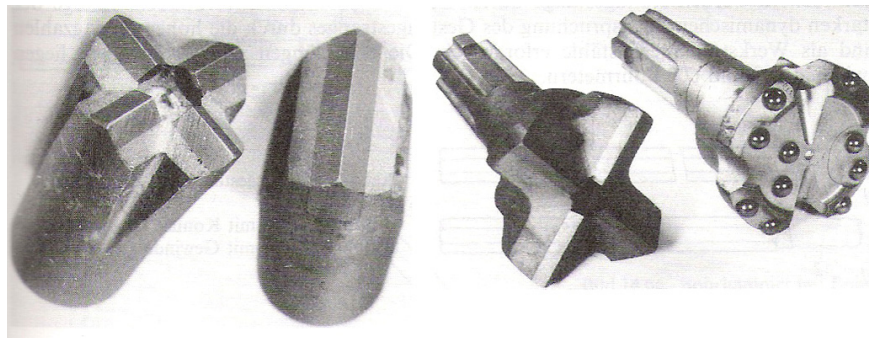


Abb. 3.9: Verschiedene Schlagbohrköpfe [9]

Um einen akzeptablen Bohrfortschritt zu gewährleisten, ist es wichtig, den Andruck des Werkzeugs auf ein Optimum einzustellen. Zu wenig Andruck führt zu einem elastischen Rückstoß des Hammers vom Meißel. Das so genannte „Tanzen“ setzt ein und der Hammer kann nicht die gesamte Schlagenergie auf den Meißel übertragen. Bei zu großen Auflasten hebt der Meißel nicht mehr von der Bohrlochsohle ab. Somit wird zusätzliche Energie zum Umsetzen benötigt, da sich die Schneide noch immer im Eingriff befindet. Dieser Effekt ist bei den kombinierten Bohrverfahren erwünscht, stellt jedoch beim schlagenden Bohren einen energetischen Nachteil dar. Der Vorteil des schlagenden Verfahrens liegt in der Möglichkeit, sehr harte Gesteine mit vertretbarem Verschleiß zu zerstören. Des Weiteren erzielt dieses Bohrverfahren nach LEHMANN [56] eine zwei bis sieben mal höhere Bohrgeschwindigkeit im kristallinen Festgestein als konventionelle Rotaryverfahren. Dies ist auf das sprödere Verhalten des Gesteins bei schlagartiger Belastung und den hohen Energieeintrag zurückzuführen. Somit können ökonomische Vorteile, wie Tagesraten für Bohranlagen, den entscheidenden Ausschlag für die Einsatzentscheidung dieses Verfahrens geben.

Nach RAO [77] kann folgender Berechnungsansatz für die Energieübertragung, ausgehend von der Kolbenbewegung, gewählt werden. Nachdem der Kolben beschleunigt wurde, trifft dieser auf die Bohrstange oder den Meißel. Dort wird eine Spannungswelle erzeugt, die bis zum Kontaktpunkt des Bohrwerkzeugs mit dem Fels läuft. An der Schneide steigt die Spannung im Fels so lange an, bis dieser versagt und der Meißel eindringt. Die elastischen Spannungswellen laufen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c durch das Medium. Um eine Beschreibung der Wellen in einem Medium zu geben, kann mit der Spannungs-Dehnungs-Beziehung gerechnet werden, wobei die Dehnrates, die Belastungsgeschwindigkeit und die Einwirkdauer in Gleichung (3.12) berücksich-

tigt werden. Folgend kann diese über das HOOKE'sche Gesetz vereinfacht werden. Die Bewegungsgeschwindigkeit ergibt sich somit aus der Längenänderung (Kompression) im dem Wellen übertragenden Medium.

$$v = \frac{\epsilon \cdot c \cdot t}{t} = \frac{\sigma \cdot c}{E} \quad (3.12)$$

Dabei gilt:

v	Bewegungsgeschwindigkeit in m/s
ϵ	Dehnung (Kompression)
t	Einwirkdauer in s
c	Schallgeschwindigkeit im Medium m/s
σ	Spannung in N/mm^2
E	Elastizitätsmodul in N/mm^2

Die allgemeine Wellengeschwindigkeit im Übertragungsstoff, mit der Dichte ρ , wird vom ausgeübten Impuls und den Stoffeigenschaften bestimmt. Hierzu kann die allgemeine Wellenbeziehung zur Bestimmung einer ebenen Welle herangezogen werden, Gleichung (3.13).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.13)$$

Die Gesamtenergie der Welle im Stoff teilt sich einen potentiellen und einen kinetischen Anteil auf. Die potentielle Energie (E_{pot}) kann als Zusammenhang des Volumens und der darin gespeicherten Spannung gesehen werden. Als kinetische Energie (E_{kin}) des Systems wird die Bewegungsenergie gesehen, welche die Verzerrungswelle durch das Material treibt. Die Energieübertragung vom Meißel zum Fels wird durch die erste Welle charakterisiert. Ein Teil der verursachten Welle geht beim Erreichen des Kontaktpunktes in das Gestein und ein Teil wird reflektiert. Die auftretende wirkende Kraft kann nach Gleichung 3.14 wie folgt beschrieben werden [77]. Des Weiteren ist die Geschwindigkeit des Körpers (Partikel) du/dt bestimmbar (Formel (3.15)).

$$F = (\sigma_i + \sigma_r) \cdot A + F_0 \quad (3.14)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{c}{E} (\sigma_i - \sigma_r) + v_0 \quad (3.15)$$

Dabei gilt:

c	Schallgeschwindigkeit im Material (Bohrstange) in m/s
E	Elastizitätsmodul (Stahl) in N/mm^2
σ_i	aufgenommene Spannung in N/mm^2
σ_r	reflektierte Spannung in N/mm^2
A	Querschnittfläche in mm^2
v_0	Geschwindigkeit vor Erzeugung der Spannungswelle in m/s
F_0	Andruckkraft in N

Dieser formelmäßigen Betrachtung gehen einige Randbedingungen voraus. Zum Beispiel, dass es sich bei den Meißelbauteilen um steife Körper handelt und keine Energieverluste durch Deformationen auftreten. Des Weiteren können Anfangsgeschwindigkeit und Andruck aufgrund ihrer Größe vernachlässigt werden (im Verhältnis zur Wellenkraft). Eine weitere Annahme ist, dass es ein ständiger Kontakt von Meißel und Gestein vorhanden ist.

3.5 Drehschlagendes und schlagdrehendes Bohren

Diese Art des Bohrens ist eine Kombination aus schlagendem und spangebendem Bohren. Das Eindringen in das Gestein wird durch die Überlagerung einer hohen Andruckkraft mit Schlagimpulsen realisiert. Zu einem Abheben kommt es dabei nicht mehr. Als konstruktives Merkmal weisen diese Bohrköpfe eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber einseitig scherender als auch schlagender Beanspruchung auf. Die Unterscheidung in die jeweilige Untergruppe ist vom Verhältnis der Schlagkraft zur Drehkraft abhängig. Drehschlagendes Bohren ist durch ein hohes Drehmoment und somit eine hohe Drehkraft im Vergleich zur kleineren Schlagkomponente, gekennzeichnet. Die Gesteinszerstörung erfolgt hierbei durch einen spanenden Hauptanteil der durch schlagartiges Eindringen der Schneiden in das Gestein unterstützt wird. Dem gegenüber steht das schlagdrehende Verfahren. In diesem Fall dringen die Schneiden durch einen Schlagimpuls in das Gestein ein und die Drehbewegung beansprucht es im Folgenden auf Scherung. Die verwendeten Bohrwerkzeuge sind laut ARNOLD [9] durch die unsymmetrischen Formen der Schneidkeile gekennzeichnet. Der Aufbau gleicht allerdings stark den Bohrwerkzeugen für das schlagende Bohren.

3.6 Anwendungen in der Gesteinsbohrtechnik

3.6.1 Die Bohrwerkzeuge

Bohrhämmer

Die Anwendung von Bohrhämmern in der Tiefbohrtechnik gilt als eine der aussichtsreichsten Möglichkeiten, die Bohrgeschwindigkeit im Hartgestein mit einem vertretbaren Verschleiß zu steigern. Die großtechnische Anwendung scheiterte bisher an den widrigen Umgebungsbedingungen, welche durch hohe Temperaturen, Vibrationen und Drücke gekennzeichnet sind. Weiterhin hat sich bei hydraulisch angetriebenen Bohrhämmern in großer Teufe der Einsatz von Spülung negativ auf Ventile und Steuereinrichtungen ausgewirkt. Als weitere Limitation kommt es bei Nutzung des Wasserschlageffektes zu einer Verfahrensgrenze durch die zu bewegende Spülungssäule.

Eine erste Unterteilung von Bohrhämmern kann nach der Art des Schlageintrags getroffen werden, wie in Abb. 3.10 verdeutlicht. Abgesehen von den verschiedenen Arten der Schlagerzeugung ist der Ort des Schlageintrags in das Gesamtsystem von entscheidender Bedeutung.

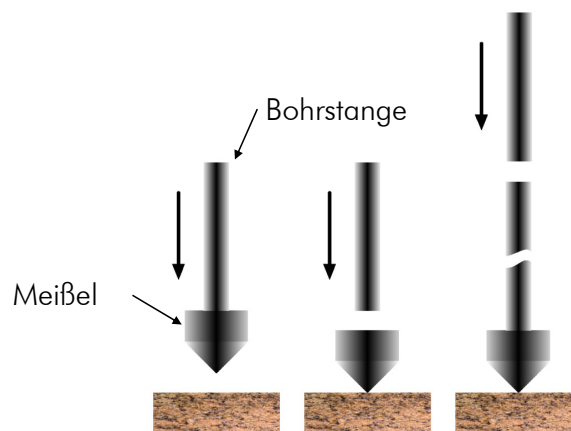


Abb. 3.10: Bereitstellung des Schlagimpulses nach KIRSTEN [50]

Der Schlag kann direkt mit dem Werkzeug, über ein Kolben-Amboss System oder oberhalb des Gestänges erzeugt werden (siehe Abb. 3.10 v.l.n.r.). Bei der Erzeugung am oberen Ende des Bohrgestänges werden diese Geräte Überflurhämmer und bei der Erzeugung im Bohrloch Imlochhämmer genannt, Abb. 3.11. Durch die unterschiedlichen Impulseintragspunkte sind die Grenzen für die Anwendungsgebiete vorgegeben. Der Überflurhammer kann durch die Einkopplung des Schlages die Impulsübergabe an den Meißel nur durch das Gestänge erreichen. Dieses fungiert als ein Feder-Dämpfersystem und gibt den Schlagimpuls mit Verlusten weiter. Diese Verluste und ein mögliches Ausknicken des Gestänges bei zu großen Auflasten, limitieren die Reich-

weite, so dass die Anwendungen vermehrt in der Flachbohrtechnik zu finden sind. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist allerdings die weitgehende Unabhängigkeit vom Bauraum, da die Schlagerzeugung außerhalb des Bohrlochs stattfindet.

Dem Nachteil der Impulsweitergabe wird bei Imlochhämmern durch die Positionierung der Schlagerzeugung möglichst nahe am Bohrwerkzeug gelöst. Das macht diese Art des Schlageintrages sehr effizient. Als problematisch kann die Energiebereitstellung für diese Systeme in großen Teufen gesehen werden. Dennoch sind von WELTERMANN [97] Tiefbohrungen mit dem Einsatz von hydraulischen Bohrhämmern in Bereichen um 2000 *m* (TVD) dokumentiert. In der oberflächennahen Anwendung werden Imlochhämmer meist mit Druckluft betrieben. Die Schlagfrequenzen können zwischen 1500 und 3000 *min*⁻¹ variieren. Der Einzelschlagweg beträgt bis zu 90 *mm* und die Kolbendurchmesser reichen von 50 bis 100 *mm* oder auch größer, je nach Anwendungsfall. Der Meißel wird so angetrieben, dass bei einem Vorwärtshub keine Drehung stattfindet. Erst nach erfolgtem Hub wird der Meißel umgesetzt, um an einem neuen Punkt auf der Sole zu wirken.



Abb. 3.11: Verschiedene Größen von Imlochhämmern [2]

Rollenbohrwerkzeuge

Die Rollenmeißel bestehen aus Kegelrollen, die auf der Bohrlochsohle abrollen, siehe Aufbau Abb. 3.12. Die Kegelrollen sind für harte Formationen mit Hartstoffstiften besetzt oder für weichere Gesteine als Zahnrollen ausgebildet. Durch die begrenzte Lebensdauer der Lager in den Rollen werden diese Meißel bevorzugt in begrenzten Drehzahlbereichen eingesetzt.

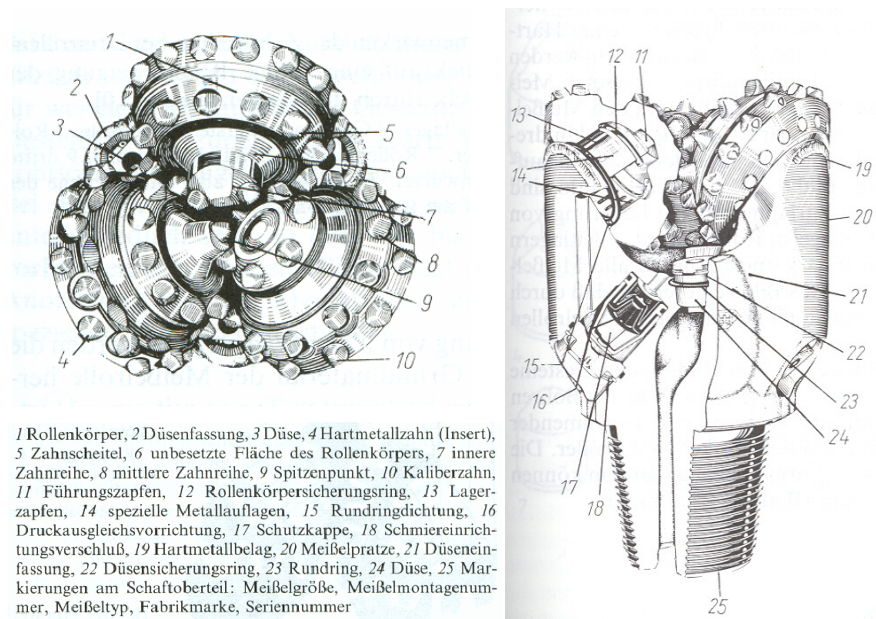


Abb. 3.12: Aufbau Rollenmeißel nach ARNOLD [9]

Die Klassifikation der Rollenmeißel wird laut AZAR [12] durch konstruktive Details vorgenommen. So können Unterscheidungen nach den Lagertypen (Standard Rollenlager, Rollenlager gedichtet bzw. ungedichtet, Gleitlager gedichtet bzw. ungedichtet), Spüldüsen und Zahnbesatz getroffen werden (siehe Abb. 3.13). Ein weiteres Kriterium ist das Offset des Rollenmeißels. Es beschreibt die Achsenverschiebung der einzelnen Meißelrollenachsen und gibt Auskunft über die Bereitstellung von scherenden Komponenten beim Abrollen und Eindringen der Meißelzähne in das Gestein. Je härter das zu erwartende Gestein desto kleiner wird das Offset gewählt und eine Druckbeanspruchung des Gesteins beim Abrollen wird angestrebt. Die Größenordnung liegt im Bereich von 0-9,5 mm. Wenn das Offset groß ist, arbeitet der Meißel eher grabend und Scherkomponenten spielen eine große Rolle beim Gesteinslösevorgang. Als weiteren, den Bohrfortschritt beeinflussende Faktor, ist der Achsenwinkel der Meißelrollen aufzuführen. Sie variieren von 33°, für sehr weiches Gestein, bis 39° bei sehr hartem Gestein. Bei weichen Formationen wirken die Rollen grabend, da die Meißelzähne eine abscherende Beanspruchung des Gesteins ausüben. Eine brechend, drückende Beanspruchung wird bei großen Achsenwinkeln genutzt um sehr harten Fels zu zerdrücken. Einfluss auf die Bohrgeschwindigkeit im Gestein haben auch die eingesetzten Spüldüsen am Meißel. In erste Linie besteht deren Aufgabe darin, einen Spühlungsstrahl zu erzeugen, der das Bohrklein von der Bohrlochsohle entfernt. Zum Transport von gelösten Gesteinspartikeln wird auf der Sohle eine Querströmung geschaffen, die das Bohrklein möglichst effizient abfördert.

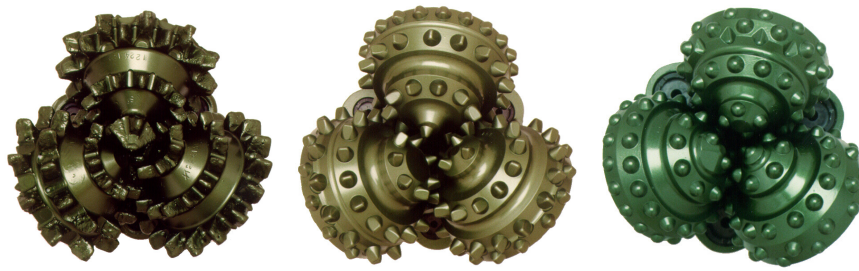


Abb. 3.13: Ausbildung des Zahnbesatzes bei wachsender Gesteinsfestigkeit (v. l. n. r.)
nach REICH [79]

Spanende Meißeltypen

Als wichtiges Merkmal dieser Art von Meißel ist das kontinuierliche Abscheren eines Spans vom Gestein zu nennen. Dieses Abscheren kann auch als schleifender Spanabtrag vonstatten gehen. Der Bohrmeißel muss hierbei stets mit einem Andruck beaufschlagt werden, der in der Lage ist, die Druckfestigkeit des Gesteins zu überwinden. Die Werkzeugschneiden sind meist asymmetrisch angeordnet, um über die Ausbildung einer Seitenkraft eine definierte Führung im Bohrloch zu ermöglichen. Folgende Einteilung kann nach AZAR [12] getroffen werden:

- Oberflächenbesetzte Diamantmeißel
- Imprägnierte Meißel
- Polykristalline Diamantmeißel (PDC)
- Thermal stabile polykristalline Meißel (TSP)

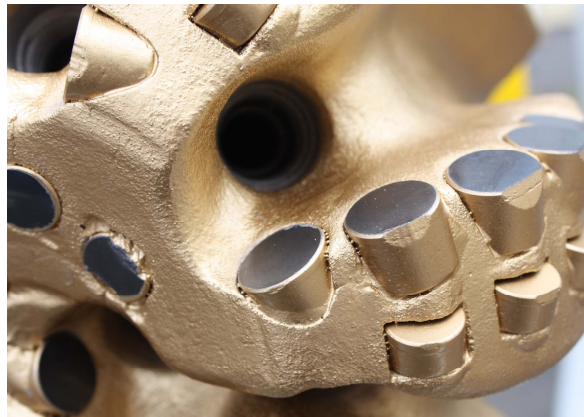
Die Ausführungsvarianten hängen von der Oberfläche und dem Material des Bohrmeißels sowie von den verwendeten Diamanten (Größe, Oberfläche, Karat) ab. Des Weiteren spielen die Seiten- und Spanwinkel eine große Rolle.

Die ursprüngliche Form von Bohrmeißel bzw. -kronen mit Diamantbesatz stellen die oberflächenbesetzten Diamantmeißel dar, siehe in Abb. 3.14 dargestellt. Hierbei wurden natürliche oder synthetisch hergestellte Diamanten händisch auf den Meißelkörper aufgebracht. Besondere Sorgfalt ist auf eine gleichmäßige Belastung der Schneidelemente zu legen, da es sonst zu Ausbrüchen kommen kann. Werden die Diamanten während des Bohrvorganges aus dem Meißelkopf gelöst, ist die schneidende Wirkung verloren.

Imprägnierte Meißel sind ebenfalls spanabhebenden Verfahren zuzuordnen. Der Materialabtrag erfolgt bei diesen Meißeltypen schleifend. Daraus ergeben sich auch die hohen zu fahrenden Drehzahlen ($400 - 1100 \text{ min}^{-1}$) beim Einsatz dieser Art von Meißel. Gerade in harten und abrasiven Gesteinsformationen haben sich diese Meißel bewährt, Abb. 3.15. Während des Bohrens findet ein Abschleifen der Trägermatrix statt und die eingebrachten Diamanten werden erneut freigelegt.

**Abb. 3.14:** Oberflächenbesetzte Diamantbohrkrone**Abb. 3.15:** Imprägnierte Diamantbohrkrone

Bei PDC-Meißeln kommen meist negative Spanwinkel zum Einsatz. Zum allgemeinen Verständnis wird dann von einem „back rake angle“ gesprochen, so dass keine negative sondern eine positive Zahl angegeben werden kann. Der PDC-Meißel kann bis 350°C ohne nennenswerte Einflüsse auf die Verschleißbeständigkeit eingesetzt werden, danach steigt der Verschleiß mit der Temperaturzunahme exponentiell.

**Abb. 3.16:** PDC Meißel

Aufgrund der niedrigen Einsatztemperaturen entstanden TSP-Meißel. Sie bestehen aus quader- oder prismenartig geformten künstlichen Diamantelementen. Der Meißelkörper besteht aus einem verschleißfesten Matrix Körper auf dem die Diamantelemente gesetzt werden. TSP wird als thermisch stabil bis 1200°C angesehen. Der Grund liegt in Mischung eines von polykristallinen Diamantwerkstoffes und einem Bindemittel, welches bei hohem Druck und hoher Temperatur gesintert wird.

3.7 Verschleißerscheinungen an Gesteinsbohrwerkzeugen

3.7.1 Besonderheiten beim Kontakt von Werkzeugen mit dem Gestein

Die Zerstörung von Festgestein ist maßgeblich durch die Struktur des zu bohrenden Körpers und das eingesetzte Bohrverfahren gekennzeichnet. Da sich der Gefügebau, die einzelnen Mineralien sowie das Vorhandensein von Inhomogenitäten je nach zu bohrendem Gestein unterschiedlich gestalten, ist es schwierig ein reproduzierbares Verschleißbild zu erhalten. Anhand von Erfahrungswerten ist es möglich, wiederkehrende Strukturen und Verschleißmuster für die jeweiligen Bohrverfahren zu erkennen und mit hoher Wahrscheinlichkeit die Ursache festzustellen.

Bei Vortrieben untertage kommen nicht nur die Schneidwerkzeuge in Kontakt mit dem Gestein, sondern auch andere Komponenten der Bohrausrüstung. Die Belastungsarten sind meist durch schleißende und abrasive Beanspruchungen gekennzeichnet. Weiterhin kommt es durch eingesetzte Spülungen zu Verschleißformen, die einen erosiven Charakter haben. Hierfür kann die Spülungszusammensetzung bzw. die Mitnahme von Gesteins- und Werkzeugpartikeln ein Auslöser sein. Im Falle der Gesteinsbohrtechnik ist die Abriebfestigkeit der Werkzeuge ein wichtiges Kriterium für den zu erwartenden Verschleiß. Beim Bohren kommt es vorwiegend zum Oberflächenverschleiß zwischen dem Meißel und der Bohrlochsohle. Dieser Vorgang wird unter Freisetzung von Reibungswärme begleitet. Diese wirkt sich über die Temperaturbeständigkeit der Schneide auf die zu fahrende Drehzahl aus. Weiterhin ist die Drehzahl verbunden mit der Kontaktzeit des Meißels bzw. Schneidelementes auf der Bohrlochsohle. Bei einer zu großen Verweildauer treten nach ARNOLD [9] verstärkt Verschleißerscheinungen am Werkzeug auf. Beim Drehbohren im Bergbau tritt vor allem Freiflächenverschleiß auf. Abhängigkeiten des Verschleißes an Drehbohrwerkzeugen bestehen nach CZUDAJ [21] zum Standweg (Weg der zurückgelegten Bohrspirale) und zur Drehzahl bzw. der Schnittgeschwindigkeit am Außenradius. Kaum einen Einfluss haben der spezifische Vorschub und die Spanstärke. Das rollende Bohren mit Zahn- bzw. Insertmeißeln wird stark von den Wirkprinzipien der Gesteinslösung, drückend bzw. grabend, bestimmt. Dies gilt auch für Verschleißerscheinungen, die von Ausbrüchen bis hin zu Auswaschungen reichen können. Additional sind auch die einzelnen Komponenten, wie Lager und Düsen, mit in eine Verschleißbetrachtung einzubeziehen. Die Hauptlimitation der rein spanenden Verfahren wird durch die vorherrschenden Temperaturen während des Spanvorganges gegeben. Dies kommt besonders bei Diamantwerkstoffen zum tragen. Versuche von TZE-PIN [93] haben gezeigt, dass PDC und TSP Meißel meist durch Brüche oder schlei-

fenden Verschleiß an den Schneiden versagen. Bei schlagenden Verfahren kommt es zu einer plötzlichen Druckbelastung der eingesetzten Schneidelemente. Das Versagensbild ist daher oftmals durch Ausbrüche gekennzeichnet. Durch das gelöste pulverisierte Gestein, welches aus dem entstandenen Krater austritt, kann es auch zu abrasivem Verschleiß kommen. Die Bestimmung, der lokal stark schwankenden Beanspruchung durch Abrasion, ist oftmals nur durch eine genaue Verschleißanalyse vorangegangener Ereignisse oder aufwendige Modellbildung möglich. Wie in den Abbildungen 3.17 und 3.18 verdeutlicht, kann ein wirksamer Verschleißschutz durch den Einsatz geeigneter Werkstoffpaarungen in den gefährdeten Bereichen erfolgen. Ein weitere Möglichkeit besteht in der gezielten Steuerung von Verschleiß verursachenden Einflüssen, wie z. B. Materialströmen.

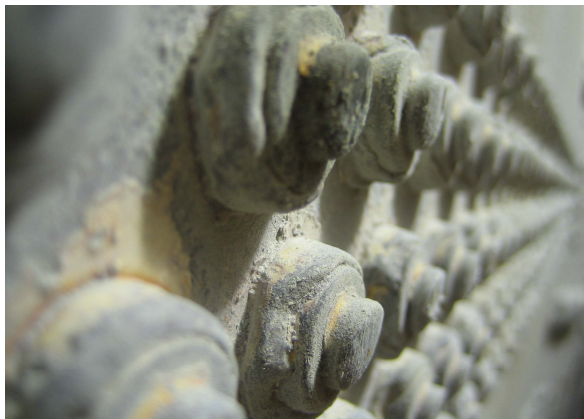


Abb. 3.17: Eingesetzte Hartmetallstifte im Kontaktbereich zum Gestein



Abb. 3.18: Hartauftrag auf einem Bauteil, welches durch große Materialströme von Lockergestein belastet wird

3.7.2 Gründe für eine Verschleißanalyse

Die Ziele einer Untersuchung an abgenutzten Bauteilen sind im Allgemeinen die qualitative und quantitative Identifizierung von Defekten und Verschleißerscheinungen. Hieraus kann eine Ableitung von Ursachen für den aufgetretenen Ausfall erfolgen. In diesem Zusammenhang ist es ebenfalls möglich, Instandhaltungsstrategien für Bauteile zu entwickeln. Eine Verschleißanalyse kann ebenfalls mit den Abläufen bei z. B. Gesteinsbohrungen gekoppelt werden. Dies kann rein subjektiv, durch augenscheinliche Prüfung oder mit Hilfe von Messtechnik anhand festgeschriebener Soll- und Istwerten (z. B. Verschleißmarken) durchgeführt werden.

3.7.3 Meißelbeurteilung bei Tiefbohrwerkzeugen

Ein ungeplanter Ausfall von Verschleißteilen, sei es ein Meißel, Aufpanzerungen oder Düsen, verursachen hohe Kosten, sei es auf einer Tiefbohranlage oder einer Gewinnungsmaschine. Um nicht in einen Zustand des unvorhergesehenen Verschleißes zu ge-

langen, werden Bauteile, die stark beansprucht sind, noch vor Ablauf ihrer maximalen Nutzungsdauer erneuert. Von der International Association of Drilling Contractors (IADC) werden z. B. Meißel aus der Tiefbohrtechnik in verschiedene Gruppen eingeteilt und auch die unterschiedlichen Verschleißmechanismen bewertet [64, 19, 43]. Hierbei wird auf alle Bauteile, wie z. B. Lager, Schneidelemente, den Kaliberbereich usw., eingegangen und die Verschleißursache dokumentiert. Im Falle eines PDC Schneidelementes lässt sich eine erste Unterteilung in die nachfolgenden Gruppen treffen, siehe Tab. 3.6.

Tab. 3.6: Verschleißerscheinungen an PDC Schneidelementen nach MOSELEY [65]

Verschleißbild	Definition
Bond Failure bzw. Lost Cutter	Fehler in der Bindung des PCD/Schneidelementes
Chipped Cutter	bei Verlust von weniger als 1/3 der Schneidenfläche
Broken Cutter	bei Verlust von mehr als 1/3 der Schneidenfläche
Delamination	Totalverlust des Diamantplättchens vom Karbid-Substrat
Heat Checking	Temperatur induzierte Alterung im unterstützenden zementierten Carbid-Substrat
Worn Cutter	abrasiver Verschleiß und Auswaschungen, bis zur Verschleißgrenze

In weiteren Studien wurde von TZE-PIN [93] gezeigt, dass die Worn und Broken Cutter noch in vier Untergruppen zu unterteilen sind. Diese sind der abrasive oder erosive Verschleiß (smooth wear), Verschleiß durch hohe Schnittkräfte (micro chipping), Verschleiß durch hohe Normalkräfte (gross fracturing) und der thermal induzierte Verschleiß. Diese Verschleißmechanismen wurden auch auf den makroskopischen Bereich ausgedehnt und durch ERSOY [38] wie folgt beschrieben.

- Abrasion (ständiger Verschleiß in weichem Gestein an der Spanfläche oder in hartem Gestein an der Freifläche)
- Beanspruchung und Alterung (verursacht durch hohe Kräfte einhergehend mit Spannungen im PCD und Werkstoffermüdung)
- Schlagbelastung (verursacht durch Schlagimpulsen z.B. makroskopische Fehler und Zugspannungen)
- thermaler Schock / Temperatur (intensiver micro-chipping Verschleiß bei Temperaturen größer 350 °C)

Die Ergebnisse der ausgebauten Meißel werden in Datenbanken zusammengefasst und ermöglichen eine Abschätzung der Lebensdauer beim Bohren in verschiedenen Gesteinsformationen. Diese Erfahrungen auch in Bezug auf andere Komponenten des Bohrstranges eröffnen somit eine breite Datenbasis bei Kenntnis des zu bohrenden Gesteins.

3.7.4 Verschleißerscheinungen an PDC Schneidelementen

Da sich diese Arbeit schwerpunktmäßig mit geometrisch bestimmten Schneiden beschäftigt, wird im Folgenden auf die Beurteilung von Verschleißerscheinungen bei grob spangebenden Verfahren näher eingegangen. Das Bohren mit PDC Meißeln ist laut MOSELEY [65] energetisch effizienter als mit imprägnierten Meißeln. Bei Testreihen auf einer Drehbank und mit automatischen Bohranlagen wurden unterschiedliche polykristalline Diamantplättchen mit Korngrößen von 3-50 μm an einem C35 Beton mit einem Füller aus Kalkstein und Quarz (Korngröße 4-32 mm) getestet. Bei vorgegebenen Randbedingungen konnten am PKD-Plättchen unterschiedliche Verschleißerscheinungen beobachtet werden.

- Grobe Brüche (gross fracturing)
- Abrasion und Absplittern (chipping)
- Alterung, Delaminierung
- HERTZ'sches Versagen
- Chemischer Verschleiß

Ähnliche Ergebnisse konnten durch ORTEGA [69] mit Hilfen von Laborexperimenten und in situ Tests dokumentiert werden, Tab. 3.7.

Tab. 3.7: Verschleißerscheinungen nach ORTEGA [69]

Verschleißbild	Bedeutung
Kombiniertes Versagen	Delaminierung des PCD vom Hartmetall und Versagen in den HM-HM Lötstellen
Grobe plastische Deformation und Scherversagen	des Hartmetalls oder des PCD-Plättchens
Chipping and Spalling	micro chipping und Abblättern der Schneidenecke
Diamantkorn micro chipping	Bruch und Herauslösen, einhergehend mit Abrasion, Zerdücken und Verschieben von einzelnen Diamantkörnern
Abrasivverschleiß von Hartmetall	bei Überschreiten der Dicke des Diamantplättchens durch die Verschleißflächengröße
Heat Checking	thermales Altern der Oberflächenschicht (im Hartmetall)

All diese Verschleißmechanismen spielen sich in relativ niedrigen Temperaturbereichen ab. Ab 750 °C werden allerdings thermale Effekte signifikant, die dann momentan nur noch mit Hartmetallen zu beherrschen sind. Der normale und erwartete Verschleiß der Schneidelemente ist der gleitende oder schleifende Verschleiß (smooth wear). Er tritt auf, wenn harte und homogene Formationen gebohrt werden, die auch abrasiv sind. Durch mechanische und thermische Belastungen werden einzelne Diamantkörner herausgelöst oder abgeschliffen. Der Spanvorgang lässt sich durch Abb. 3.19 beschreiben. Als typische Schädigung der Schneide kann der in Abb. 3.20 dargestellte Zustand angesehen werden.

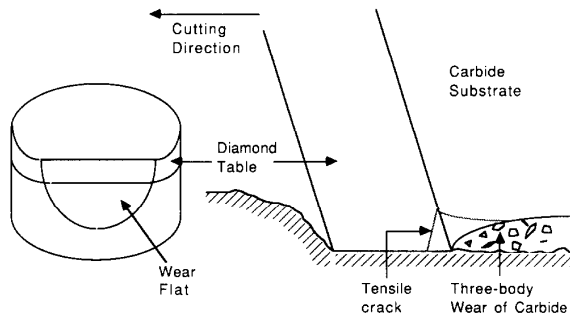


Abb. 3.19: Entstehung schleifender Verschleiß [93]



Abb. 3.20: Darstellung des Verschleißbildes [93]

Trotz der höheren Härte von Diamantwerkstoffen gegenüber Quarz ist TZE-PIN [93] der Meinung, dass ein Zusammenspiel von mechanischen und thermalen Effekten zu diesen Verschleißbild führt. Durch hohe Temperaturen werden die Umwandlung in Graphit und Oxidationen begünstigt, was wiederum die Rissbildung im mikroskopischen Bereich fördert. Als Quelle von Temperaturanstiegen lassen sich Reibungsvorgänge zwischen Schneide und Quarzkörnern identifizieren. Des Weiteren findet ein drei Körper Verschleiß an den Hartcarbiden, die das PKD Plättchen unterstützen, statt. Die schleißenden Materialien setzen sich aus zerstörtem Gestein, Hartcarbiden und Partikeln aus polykristallinem Diamant zusammen. Durch den fortschreitenden Abtrag der stützenden Flanke werden Spannungsrisse in der Diamantplatte induziert. Die durch den Gesamtvorgang entstehende Fläche ist proportional zur Schnitttiefe zu sehen.

Wird in Folge des Schneidvorganges die zulässige HERTZ'sche Pressung an der Schneide überschritten, so kommt es zum Ausbruch vom Material. Dies wird als HERTZ'scher Verschleiß bezeichnet.

Dem gegenüber stehen die Mechanismen der Abrasion und des Absplitters von Werkstoff (chipping), hervorgerufen durch sehr hohe Schnittkräfte. Die Wirkrichtung der Abplatzungen liegt dabei auf einer Fläche parallel zur Schnitttrichtung. Die Risse treten im Diamantplättchen auf, können aber auch bis in die Hartcarbide reichen. Microchipping findet an den Flanken der Schneidelemente statt.

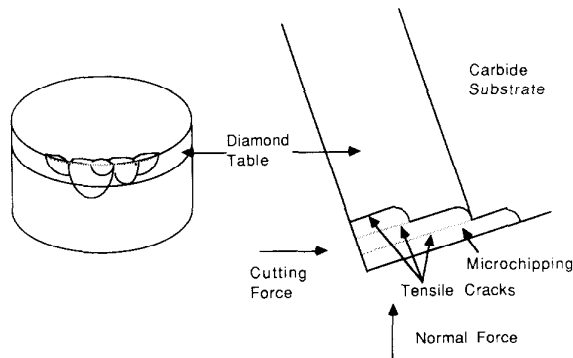


Abb. 3.21: Verschleißmechanismus beim microchipping [93]

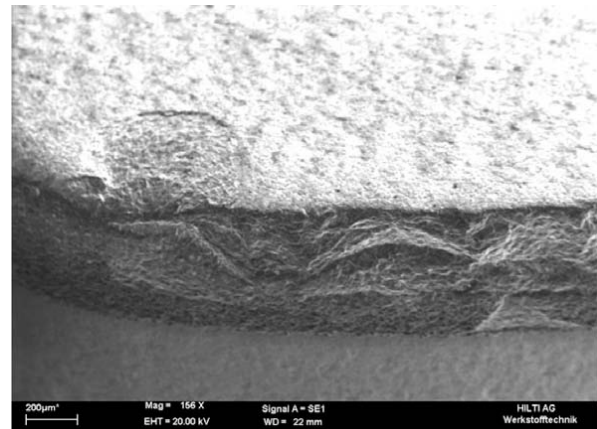


Abb. 3.22: Mikroabspaltungen an einer PKD-Schneide [65]

Der Unterschied zum drei Körper Verschleiß liegt im Ablauf der Ausbildung des Verschleißbildes. Es beginnt mit kleinen Abplatzungen an den Flanken des PKD-Plättchens, die dann größere zur Folge haben. Ist das Plättchen zerstört, kommt es zu einem schnellen Abtrag der stützenden Carbide und es bilden sich die typischen Anzeichen aus, Abb. 3.22.

Treten beim Bohren hohe Auflasten oder Kräfte von der Seite auf, so bildet sich ein grober Bruch (gross fracturing) am PKD-Plättchen aus. Die Rissausbreitung erfolgt nach MOSELEY [65] zum Zentrum der Platte gerichtet, Abb. 3.23 und 3.24.

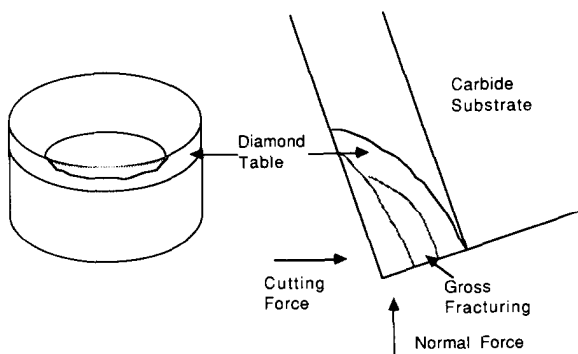


Abb. 3.23: Verschleißmechanismus des gross fracturing [93]

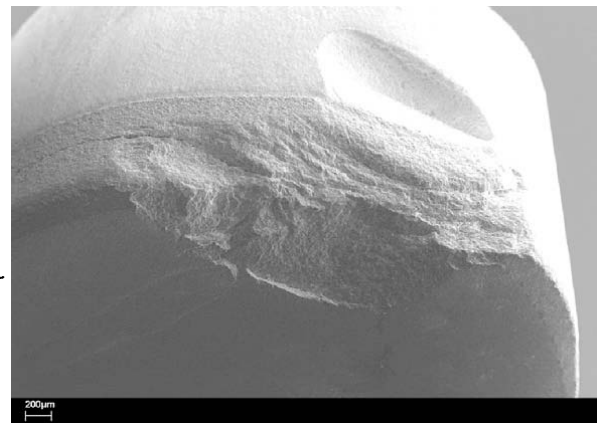


Abb. 3.24: Grobe Ausbrüche an einem PKD-Probekörper [65]

Dieser Mechanismus findet während einer sehr kurzen Zeitperiode statt. Dies kann z. B. beim Auflaufen der Schneide auf eine sehr harte Formation, z. B. Feuerstein, auftreten.

Als weitere Verschleißerscheinung ist die Delaminierung aufzuführen. Dabei sind die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des PKD-Plättchens und des stützenden Hartcarbides die Ursache für eine Ablösung des Diamantwerkstoffes. Ein Auftreten geht meist einher mit einer unzulässig hohen axialen Belastung, welche dann die geschwächte Bindung zwischen den beiden Hartstoffen aufspaltet. Temperatursprünge während des

Bohrens sind die Ursache für Delaminierung. Diese treten meist auf, wenn einer der anderen Verschleißfaktoren schon eingetreten ist.

Hierzu ist auch eine Temperatur induzierte Alterung des Werkstoffes, das so genannte heat checking, zu rechnen. Diese tritt beim Erhitzen und Abkühlen während des Bohrens auf.



Abb. 3.25: Heat checking an einem Probekörper [93]

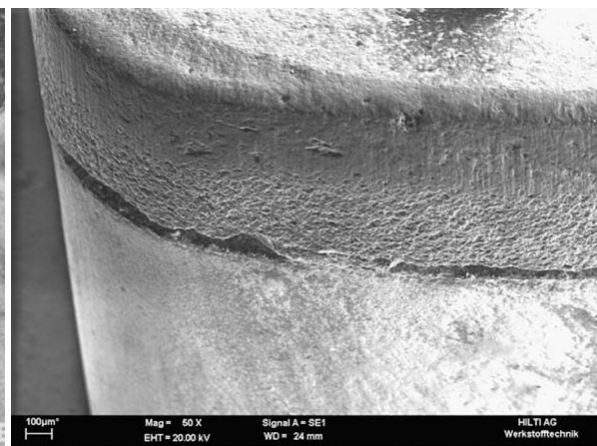


Abb. 3.26: Chemischer Verschleiß an einem PKD-Probekörper [65]

Der Vorgang ist meist mit einem anderen Verschleißvorgang gekoppelt. Da konstruktionsbedingt hohe Temperaturschwankungen vermieden werden, kann als Wärmequelle oftmals ein unzulässig verschlissenes Bauteil die Ursache sein.

Als weiterer nicht mechanisch hervorgerufener Verschleißvorgang ist der chemische Verschleiß zu sehen, dessen Ursachen in aggressiven Umgebungsmedien bzw. in entstehenden Reaktionsschichten liegen.

3.7.5 Rückwirkungen vom Gestein auf das Werkzeug

Durch Untersuchungen von BESTE [16] wurden unterschiedliche Arten von Rückkoppelungseffekten von Werkzeug und Gestein identifiziert. Die Tests wurden mit einer Cemented-Carbide Spitzen gemacht, die über Gesteinsoberflächen (Quarzit, Granit, Chromit, Mangan und Gips) gezogen wurde. Dabei stellte sich heraus, dass bei großen und harten Körnern ein sehr schneller Verschleiß der Spitze auftritt. Die genauere Untersuchung der Probekörper zeigte, dass sich das Gestein an dem Hartstoff anlagert bzw. in ihn eintritt. Es wurden drei Typen von Gesteinsintegration in die bestehende WC/Co Struktur erkannt.

- Partielle Gesteinsanlagerung
- gemischte Schicht
- Gesteinskanäle

Die Anlagerung von Gestein findet in dem oberen Randbereich statt. Je nach Gestein bildet sich eine neue komplexe Oberflächenzone aus. Bei der gemischten Schicht wurde die Binderphase durch Gesteinsmaterial ersetzt. Die Dicken dieser Schichten betrugen $1 - 40 \mu m$. Die Gesteinskanäle verliefen bei den durchgeführten Versuchen bis in Tiefen von $800 \mu m$ und es entsteht eine Art Pumpeffekt, der das Gesteinsmaterial in den Hartstoff saugt, wie in Abb. 3.27 zu sehen. Das Gesteinskorn (weiß) dringt im Zuge des Schneidvorganges a) - c) immer tiefer in die Hartstoffschicht (dunkel) ein, bis es vollständig eingeschlossen ist, d). Das Chrom der Binderphase wird dabei zur Oberfläche gebracht.

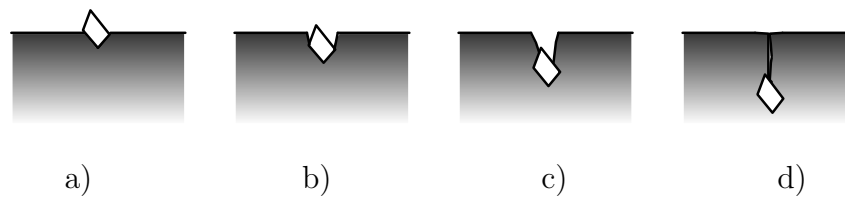


Abb. 3.27: Ausbildung tiefer Gesteinskanäle nach BESTE [16]

Durch Beobachtungen wurden auch die Thesen über Schmelz- und Schockwellenergebnisse geäußert. Die beobachteten Eigenschaften könnten interessant bezüglich der Verschleißigenschaften von Gestein zu Gestein sein. D. h. eine solcher Effekt könnte genutzt werden, um einen autogene Verschleißschutz zu kreieren. Ein Ansatz könnte ein Werkstoff sein, der harte Gesteinsteilchen in sein Gefüge einbaut.

4 Eingesetzte Versuchstechnik

4.1 Zielstellung der Teststände

Eine Anlage wurde konzeptionell auf spanendes Bohren ausgelegt. Dem gegenüber standen Grundlagenuntersuchungen zu schlagenden Verfahren, die an einem Fallwerk getestet wurden. Die Versuchsaufbauten zielen auf eine Ermittlung der Belastungen an den Schneidelementen hin. Hierzu sind die Bohrparameter zu dokumentieren und im Nachgang eine Bewertung der Schneidelemente durchzuführen. Weiterhin ist durch die Versuche eine Einschätzung der Zerspanbarkeit und die Auswirkung von schlagartigen Belastungen, hervorgerufen durch den Bohrprozess in sehr harten Gesteinen, möglich. Die Werte aus den Versuchsergebnissen legen den Grundstein für eine Verschleißanalyse von konventionellen und neuen ultraharten Materialien in Bezug auf deren Eignung zum Bohren in Festgestein. Für die Testanlagen lassen sich grundlegende Unterscheidungen in der Art der Gesteinszerstörung treffen.

4.2 Versuchsstand zum spanenden Bohren

4.2.1 Anforderungen an den Versuchsstand

Zur Bewertung von spanenden Verfahren zum Zerstören von Festgestein wurde ein kompakter Versuchsstand entworfen und aufgebaut. Die Vorteile der Anlage bestehen in den geringen Abmaßen für die Gesteinsproben und den geringen benötigten Mengen an Schneidstoffen. Der Versuchsstand muss stabil, kostengünstig und nachrüstbar in Bezug auf Messtechnik und Hilfsaggregate sein. Weitere Anforderungen wurden an die Messtechnik gestellt. Zum einen war die einfache Kalibrierung der eingehenden Spannungs- und Stromsignale, zum anderen auch die Visualisierung für den Bediener ein erklärtes Entwicklungsziel. Die schnelle Übermittlung der gewonnenen Messwerte an einen Computer stellt den letzten Schritt der Datenübertragung am Versuchsstand dar.

4.2.2 Komponenten und Messtechnik

Der Teststand wurde im Rahmen des Freiburger Hochdruckforschungszentrums konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Hierzu wurde ein Gestell für alle notwendigen Komponenten ausgelegt. Bohrgerät, Messtechnik, Auswerteeinheit und Bohrwerkzeug wurden ausgewählt und zusammengefügt. Der somit entstandene Kleinkaliberbohrversuchsstand am Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau ist in Abb. 4.1 zu sehen.

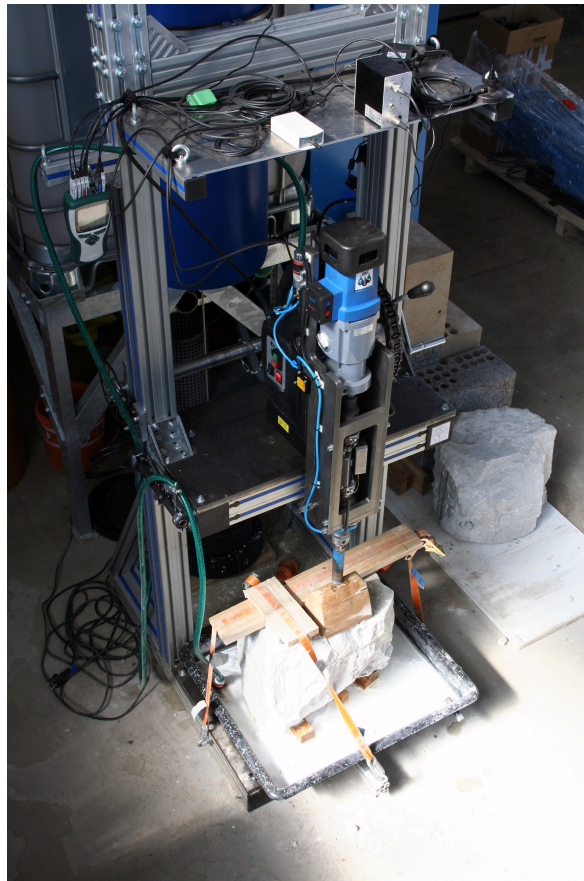


Abb. 4.1: Bohrversuchsstand mit Messtechnik und mechanisches Vorschubsystem

Als Antrieb des Bohrwerkzeugs kommt eine Magnetbohrmaschine zum Einsatz, die auf einer Rahmenkonstruktion aus BOSCH-REXROTH-Profilen fixiert ist. Vorteil bei dieser Aluminiumprofilbauweise ist die Nachrüstbarkeit, die durch die umfangreichen Befestigungsmöglichkeiten an den Profilen gegeben ist. Weiterhin lässt der Maschinenträger, welcher aus einer Stahlplatte besteht, eine freie Positionierung der Bohrmaschine zu. Als Drehantrieb wird eine Magnetbohrmaschine der Firma BDS Maschinen verwendet. Der Antrieb ist Drehzahlregelbar und lässt Drehzahlen von 40 bis 600 min^{-1} zu. Die verwendete Messtechnik zeichnet mit einer Frequenz von 10 Hz die Messwerte von Andruck, Drehmoment, Bohrweg und Drehzahl auf. Die einzelnen Komponenten der Messensorik wurden für die jeweilige Aufgabe kalibriert bzw. verfügen über Kali-

brierungstabellen der Hersteller.

Der Andruck und das Drehmoment des Meißels werden direkt über dem Werkzeugträger auf einer Messwelle mittels Dehnmessstreifen gemessen. Die Kalibrierung der Messwelle erfolgt über ein Referenzgerät am Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik. In Abb. 4.2 ist die Messwelle für den Bohrversuchsstand dargestellt. Sie beinhaltet sowohl die Dehnmessstreifen als auch die Auswerteeinheit und den Sender zur Datenübertragung.

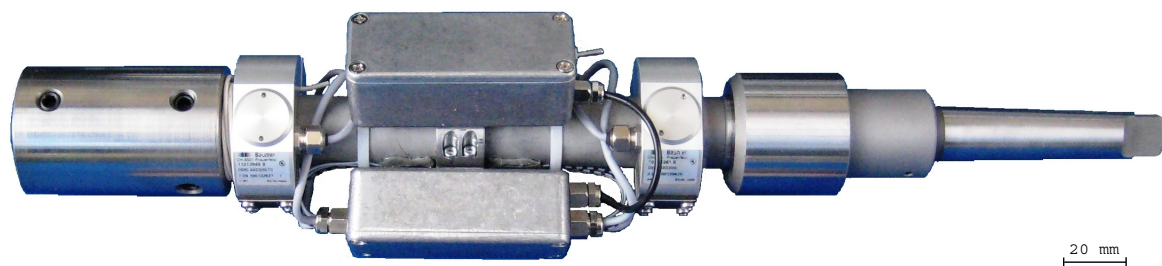


Abb. 4.2: Messwelle des Bohrversuchsstandes zum spanenden Bohren

Der Bohrweg wird mit einem Laser-Interferometer und die Drehzahl mit einem Hall-Sensor gemessen. Diese Daten werden an ein Aufzeichnungsgerät, den Datenlogger der Firma ALMEMO übertragen. Mit Hilfe des Loggers können auch während des Bohrvorganges die Werte für den Bediener visualisiert werden. Um die erhaltenen Daten nach Beendigung des Bohrvorganges weiter zu verarbeiten, besteht über eine Computerschnittstelle die Möglichkeit, die Werte auszulesen. Auch eine Echtzeitvisualisierung auf einem Computer ist so möglich. Der Energieeintrag in das Gestein kann aus Drehzahl, Andruck und Drehmoment am Bohrwerkzeug nach Gleichung (3.6) ermittelt werden. Um die erreichte Bohrgeschwindigkeit zu quantifizieren, muss des Weiteren der Bohrweg und die Bohrzeit bekannt sein.

4.2.3 Werkzeugaufnahme

Der zum Einsatz kommende Werkzeugträger (Abb. 4.3) ist ein speziell angefertigter Wendeplattenbohrer mit einem Außendurchmesser von 32 mm. Die anfänglichen Versuche konzentrierten sich auf industriell vorhandene Schneidplatten, um eine Verifizierung des Versuchsaufbaues in Bezug auf Funktionalität zu ermöglichen. Die untersuchten Wendeschneidplatten bestehen aus Hartmetall mit unterschiedlichen Titanitridbeschichtungen und die Befestigung erfolgte über zentrisch angeordnete Spannschrauben. Der zweite Werkzeugträger, Abb. 4.4, verwendete neuartige Schneidstoffe vom Institut für Werkstoffwissenschaft, die mittels einer FAST-Anlage gesintert wurden [62]. Für diese neuen Schneidstoffe musste der Werkzeugträger die Schneidplatten über

Spannelemente fixieren, da eine Befestigung mittels Spannschrauben verfahrensbedingt ausschied.



Abb. 4.3: Träger für konventionelle Wendeschneidplatten aus dem Maschinenbau



Abb. 4.4: Träger für Schneidmaterialien aus neuen Werkstoffen

4.2.4 Weiterverarbeitung der Rohdaten

Aus den gemessenen Rohdaten werden mittels VISUALBASIC Software Messprotokolle erstellt. Durch den Messaufbau bedingte Abweichungen, welche die aus der Halbbrückenschaltung von Drehmoment und Andruck über die Querdehnung der Messwelle hervorgehen, werden durch einen vorher bestimmten Kompensationswert ausgeglichen (siehe Anhang C). Zusätzlich werden Bohrgeschwindigkeit, spezifische Energie (Formel (3.7)) und Schnitttiefe berechnet. Hieraus wird ein Graph erstellt, der den Verlauf der gemessenen Größen abbildet. Dieser Graph erlaubt eine zeitliche Eingrenzung des tatsächlichen Bohrvorgangs. Weiterhin ermöglichen die Kurvenverläufe eine erste Analyse des Bohrvorganges. Eine weitere Berechnungsoption ist die Bestimmung von Mittelwerten über einen eingegrenzten Bereich des Bohrvorganges für Andruckkraft, Drehmoment, spezifische Energie, Schnitttiefe und Bohrgeschwindigkeit. Der Verschleiß der Werkstoffproben am Bohrwerkzeug wird durch die Ermittlung der Massenverluste der einzelnen Wendeschneidplatten bestimmt. Alle Platten werden vor und nach dem Bohrvorgang gewogen. Bei jedem Versuch werden jeweils neue Schneiden eingesetzt. Die Massen werden im Versuchsprogramm festgehalten und die Massenverluste durch Differenzbildung bestimmt. Zur Analyse der Mechanismen bei der spangebenden Gesteinszerstörung kommt eine Hochgeschwindigkeitskamera zum Einsatz.

4.2.5 Weiterer Ausbau der Versuchsanlage

Nach Beendigung der spanenden Versuchsreihen sollte das Anwendungsfeld der Versuchsanlage erweitert werden. Eine modulare Umrüstbarkeit, mit dem Hintergrund von Testszenarien unterschiedlicher Werkzeuge, war das Ziel. Auch eine Erhöhung der Sicherheitsstandards an der Anlage stellte ein Kriterium dar. Als Ergebnis entstand

ein flexibel auszurüstender Versuchsstand mit einem baulich abgetrennten Versuchsraum und einer SPS Steuerung, Abb. 4.5. Bei allen Bohrverfahren, unabhängig ob sie drehender, drehschlagender oder schlagender Natur sind, sind der Vorschubweg, einhergehend mit der Vorschubgeschwindigkeit bzw. Bohrgeschwindigkeit und die Vorschubkraft wichtige Prozessparameter. Eine exakte Messung und Regelung dieser ist für die Erprobung von schlagenden Verfahren und von neuen Schneidstoffen mit Hilfe einer Drehbohrmaschine unabdingbar. Herzstück bildet eine regelbare Linearachse mit Kugelgewindetrieb (Abb. 4.6).



Abb. 4.5: Verbesserter Versuchsstand mit Linearachse und SPS Steuerung

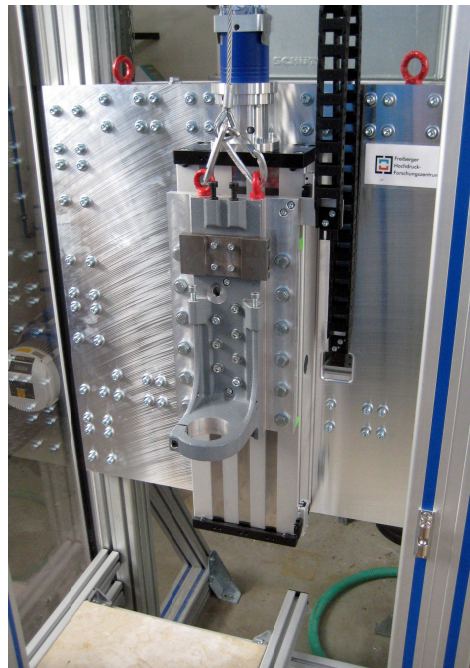


Abb. 4.6: Linearachse mit Träger für Drehantrieb

Zur Messwertaufnahme der Drehbohrmaschine gehören weiterhin der Vorschubweg, die Bohrgeschwindigkeit, die Vorschubkraft, das Drehmoment und die Drehzahl. Bei den schlagenden Verfahren werden Vorschubweg, Bohrgeschwindigkeit, Vorschubkraft und eventuelle Kolbenstangenbewegungen erfasst. Die Erstinbetriebnahme wurde erfolgreich abgeschlossen und der Umbau kann somit als vollendet bezeichnet werden. Als weiteres Anwendungsfeld kann die tribologische Untersuchung von Paarungen Hartstoff- Gestein an diesem Teststand realisiert werden.

4.3 Versuchsaufbau zur schlagenden Gesteinszerstörung

4.3.1 Funktionsweise des Versuchsstandes

Die Versuche zur schlagenden Gesteinszerstörung wurden an einem Fallwerk durchgeführt, welches sich am Institut für Werkstofftechnik der TU Bergakademie Freiberg

befindet, Abb. 4.7. Es setzt sich aus einem Führungsrahmen, einer Probenaufnahme sowie dem Fallgewicht zusammen. An dieser Masse können Werkzeuge wie z. B. ein Stempel oder in diesem Fall ein Meißel befestigt werden. Peripher ist die Sensortechnik angebracht, mit der Datenaufnahmeraten im MHz -Bereich möglich sind. Durch Vorgabe der Fallhöhe wird die potentielle Energie des Schlagvorganges eingestellt. Die Bewegung des Fallgewichtes, des Werkzeugträgers und des Schlagwerkzeugs erfolgt durch die Erdbeschleunigung nach einem definierten Startsignal. Hierbei wird der ganze Versuchsaufbau gleichmäßig beschleunigt, bis er auf die Gesteinsprobe trifft, welche auf dem Maschinentisch fixiert ist. Infolge des Schlagvorganges kommt es zu einer Abbremsung des Meißels während der Energieübertragung auf das Gestein. Danach wird das Schlagwerkzeug durch die nicht vom Gestein dissipierte Energie wieder vom Gesteinskörper zurück beschleunigt.

Der Versuchsaufbau ist aus einer Aufnahme für die Gesteinsprobe, einem Fallgewicht (194 kg) und einem daran angebrachten Meißel aufgebaut, vergl. Abb. 4.8. Der Durchmesser des Meißelschaftes beträgt 25,4 mm. Weitere Baugruppen des Versuchsstandes sind der Maschinentisch zur Fixierung der Materialproben und die Messtechnik zur Datenaufzeichnung und -auswertung. Als Meißelformen wurden eine flache Schneide sowie ein Insert eingesetzt. Die Längsschneide repräsentiert eine übliche Schneidenform für Sprenglochbohrungen und das Insert wird üblicherweise bei Rollenmeißel verbaut.



Abb. 4.7: Fallwerksversuchsstand

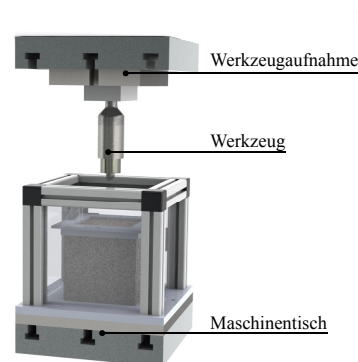


Abb. 4.8: Versuchsaufbau

Die während des Schlagvorganges auftretenden Kräfte werden aus der dynamisch elastischen Verformung der Meißelhalterung berechnet. Diese wird über Dehnmessstreifen bestimmt, die an einer servohydraulischen Prüfmaschine kalibriert wurden. Die Verstärkung des Kraftsignales erfolgte über einen TEKTRONIX M 504 Verstärker. Der von dem Meißel zurückgelegte Weg wird über ein magnetisches Messsystem, das mit einer Auflösung von $10\ \mu m$ arbeitet, bestimmt. Die Parameter wurden in Zeitintervallen von $1\ ns$ über das Genesis 5i Data Acquisition System der Firma NICOLET mittels der Software PERCEPTION erfasst. Als Probekörper dienen mehrere Gesteinswürfel aus Quarzporphyr Kantenlängen von 15 cm. Auf diese wurden der Meißel und das Fallgewicht aus

einer definierten Höhe fallen gelassen [56].

Ziel der Versuche war es, die auftretenden Kräfte und Spannungen, die ins Gestein eingetragenen Energien sowie die erreichte Eindringtiefe zu bestimmen. Zu Beginn der Versuche wurde das Fallgewicht auf eine vorgegebene Höhe über der Oberseite der Gesteinsprobe in Stellung gebracht. Anschließend wurde der bewegliche Versuchsaufbau ausgeklinkt. Die potentielle Energie (E_{pot}) am Ausgangspunkt wandelte sich in kinetische Energie (E_{kin}) und damit in Schlagenergie ($E_{S,kin}$) beim Auftreffen des Meißels auf das Gestein um. Im Laufe der Versuchsdurchführung werden Schläge aus Fallhöhen zwischen 10 mm und 100 mm ausgeführt. Dabei erfolgte jeder Schlag auf eine neue glatte und unbeschädigte Oberfläche der Probekörpers.

4.3.2 Auswertemethoden

Die gewonnenen Rohdaten wurden gesichtet und der eigentliche Schlagvorgang, welcher nur wenige Millisekunden dauerte, eingegrenzt. Die Eingrenzung war erforderlich, um ein wiederholtes Auftreffen des Meißels nicht mit in die Berechnungen einzubeziehen. Problematisch waren hierbei die geringen Fallhöhen, da ein sicherer Fangvorgang in diesem Falle nicht möglich war. Die umfangreichen Rohdaten konnten dann in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen und ausgewertet werden. Additional fanden Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera statt, um den eigentlichen Vorgang genau zu dokumentieren. Im Zuge der Versuche war es weiterhin möglich, das gelöste Material zu begutachten. Die Nutzung einer Füllmasse zur Volumenbestimmung der erzeugten Krater verfeinerte die Messungen weiter.

4.4 Fehlerbetrachtung für die Messergebnisse

4.4.1 Allgemeines zur Fehlerbetrachtung

Die Ermittlung von Messwerten mit technischen Systemen kann als fehlerbehaftet bezeichnet werden. Hierbei stellt ein Fehler eine Abweichung vom Ist- zum Sollwert dar. Eine Typisierung kann in erwartete und unerwartete Fehler erfolgen. Hierbei können erwartete Abweichungen durch Änderung des Messaufbaus oder Verwendung von andere Messtechnik vermindert werden. In Bezug auf die Angabe der Abweichungen von Messgeräten ist in absolute und relative Fehler zu unterscheiden.

Die Fehlerauswirkungen im Vergleich zu den erwarteten Fluktuationen der Messwerte, welche durch die Gesteinslösevorgänge entstehen, wurde als gering erachtet. Somit fand eine nähere Begutachtung der Versuchsergebnisse unter diesem Gesichtspunkt nicht statt. Die unterschiedlichen Messverfahren für spanendes und schlagendes Bohren sind mit Messabweichungen behaftet und werden im Folgenden näher erläutert.

4.4.2 Messabweichungen am Kleinkaliberbohrversuchsstand

Die Abweichungen der Messergebnisse wird bei den spanenden Verfahren weitestgehend durch die Dehnmessstreifen, die Telemetrie und die En- bzw. Decoder der Sender und Empfänger verursacht. Bei der Erfassung von Andruck und Drehmoment wurde ein relativer Gesamtfehler 1,1 % ermittelt. Die schon angesprochenen Abweichungen durch die Halbrückenschaltung werden durch eine Berechnungsroutine ausgeglichen. Weiterhin ist vor Messbeginn eine Nullung der Dehnmessstreifen durchzuführen um eventuelle Temperatureinflüsse zu minimieren. Für die Bestimmung des Bohrweges mittels des Laserinterferometers ergibt sich laut Hersteller ein Linearitätsfehler von $\pm 0,18$ bis $\pm 1,20 \text{ mm}$. Der Hall Sensor zur Drehzahlbestimmung kann durch die hohe Abtastrate von 3200 Hz von der Fehlerbetrachtung ausgeschlossen werden, da die Anlage nicht für solch hohe Drehzahlbereiche konzipiert wurde. Zur Ermittlung der Verschleißes wurde eine Präzessionswaage mit einer Messwertabweichung von $\pm 0,001 \text{ g}$ verwendet.

4.4.3 Messabweichungen am Fallwerk

Die Messtechnik am Fallwerk nutzt zur Ermittlung der Kraftverläufe ebenfalls Dehnmessstreifen. Die Datenübermittlung der Messwerte erfolgte nicht über ein gesondertes Codierungs- und Sendemodul so dass die Messwertabweichung geringer als beim Kleinkaliberbohrversuchsstand einzustufen sind. Die Kalibrierung der Dehnmessstreifen erfolgte Analog zur Messwelle am Institut für Geotechnik. Nachfolgende Abweichungen beim Bestimmen der Kratervolumina sind als zufällige Fehler zu werten.

4.5 Schneidmaterialien für die Versuche

4.5.1 Konventionelle Wendeschneidplatten

Bei den Schneidstoffen für die spanende Bearbeitung von Gestein wurden zunächst beschichtete Wendeschneidplatten verwendet, die für unterschiedliche Arten der Metallbearbeitung vorgeschlagen werden. Die Wahl von Wendeschneidplatten für das Zerspanen von Metall gründet sich auf die einfache und erprobte Befestigungsmöglichkeit mittels Spannschrauben am Bohrkopf. Schneidstoff 1 wird industriell für die Bearbeitung von vergütetem Stahl genutzt. Der zweite Schneidstoff ist für die Bearbeitung von Gusseisen geeignet. Die Beschichtungen der Wendeplatten bestehen aus Titancarbid/Titannitrid (TiC/TiN) bzw. bei Schneidstoff 2 aus Titancarbonitrid/Titannitrid (TiCN/TiN). Nach Vorversuchen mit Granit kristallisierte sich der Einsatz von Schneidstoff 2 für weitere vergleichende Versuche heraus. Grund hierfür ist die bessere Beständigkeit gegen Schnittkraftspitzen, welche durch die Bindung von Mineralkörnern verursacht

werden (siehe Kap. 3.3.1).

4.5.2 Wendeschneidplatten aus neuen Materialien

Die neuen Schneidstoffe aus dem Teilprojekt 6 des Freiburger Hochdruckforschungszentrums (vergl. Kap. 1.2) bestanden nach MANDEL [61] aus „near-nano WC-Co“ mit Korngrößen im Bereich von etwa 190 nm und einer relativen Dichte von $99,8\%$. Das Ausgangsmaterial setzte sich aus $90\text{ Ma.} - \%$ WC und $10\text{ Ma.} - \%$ Co halbmikron Pulver zusammen. Diese Pulver wurden gemischt und in einer Ballmühle zu einem Nanopulver verarbeitet. Die Sinterung wurde mit der FAST Anlage am Institut für Werkstofftechnik durchgeführt. Nach Herstellung der Rohkörper wurden umfangreiche Werkstoffuntersuchungen vorgenommen, um die Haupteigenschaften des Schneidstoffes zu bestimmen. Hierzu zählen Tests bezüglich der Härte, Druckfestigkeit (Abb. 4.9) und auch Ritzversuche. Um die Mikrostruktur zu untersuchen, wurden Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop vorgenommen.

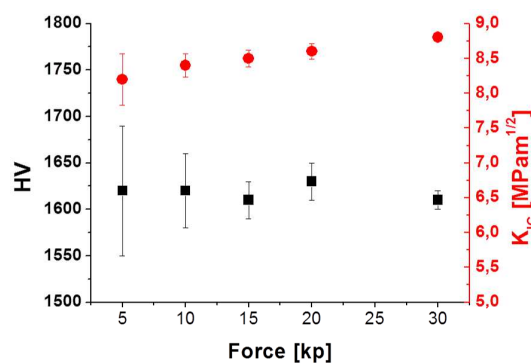


Abb. 4.9: Testergebnisse von Härte und Bruchzähigkeit nach MANDEL [62]

Die zylindrischen Rohkörper besaßen nach dem Sintern, Abb. 4.10, einen Durchmesser von etwa 20 mm und eine Dicke von 5 mm . Durch Schleifen wurden die Proben zu Schneidplatten mit einer Kantenlänge vom 10 mm und einer Dicke von $4,9\text{ mm}$ bearbeitet (Abb. 4.11).



Abb. 4.10: Werkstoffproben nach dem Sintern nach MANDEL [62]

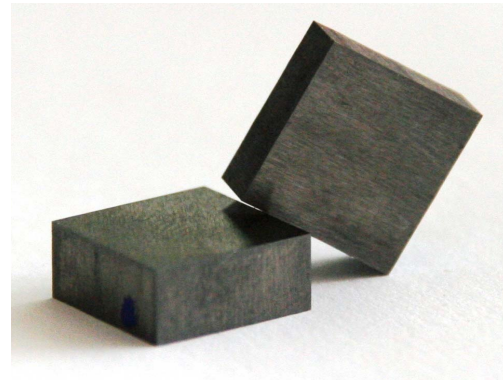


Abb. 4.11: Schneidplatten nach der Bearbeitung

In dieser Form sind die Platten im Bohrkopf klemmbar und können paarweise in den Bohrversuchen eingesetzt werden.

4.5.3 Schlagbohrköpfe und Inserts aus Rollenbohrwerkzeugen

Zur Durchführung der Fallwerksversuche fand ein Schlagbohrkopf aus der Sprenglochherstellung Anwendung, Abb. 4.12. Dieser besteht aus einem Schaft mit Morsekegel-pressung und einer Schneide aus Hartmetall. Die Längsschneide führt zu einer starken Zunahme der Kontaktfläche mit zunehmender Eindringtiefe des Meißels in das Gestein. Mit Hilfe eines CAD-Programms konnte die Fläche über der Eindringung berechnet werden, so dass auch Aussagen über die Flächenpressungen zwischen Gestein und Meißelspitze möglich sind.



Abb. 4.12: Schlagbohrkopf



Abb. 4.13: Eingelötetes Insert

Um eine besser zu beschreibende Kontaktfläche zu erhalten, wurde in einem zweiten Versuchsprogramm ein Hartmetallinsert aus einem Rollenmeißel verwendet worden, Abb. 4.13. Diese Inserts wurden von der Firma SMITH International Deutschland GmbH bereitgestellt. Hierzu ist ebenfalls ein gehärteter Schaft notwendig, in den das Insert mittels Hartlot eingesetzt wird. Die Härtung der Werkzeugaufnahmen wurden

am Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Die Oberfläche des mit dem Gestein in Kontakt stehenden Schneidelementes ist als eine Kugeloberfläche mit Übergang in einen konischen Bereich beschreibbar.

4.6 Verwendete Gesteine

4.6.1 Vorbetrachtungen

Für die Versuche wurden unterschiedliche Gesteine verwendet. Die Auswahl reichte von Sedimentiten über Metamorphite bis hin zu Magmatiten. Zur Erprobung einer großen Bandbreite an Festigkeiten und Abrasivitäten wurden für die spangebenden Bohrverfahren von Postaer Sandstein bis hin zu Lausitzer Granit verschiedenste Festgesteine genutzt. Die Durchführung der Fallwerksversuche basierte auf elastisch-spröden Gesteinen, die sich in ihrer mineralogischen Zusammensetzung, ihrer Entstehung und somit auch in ihren mechanischen Eigenschaften unterscheiden. Bei den ausgewählten Gesteinen handelte es sich um einen Rhyolith, einen Quarzit und einen Gabbro. Als Auswahlkriterien der Gesteine wurden eine hohe einaxiale Druckfestigkeit, eine starke Abrasivität nach RAI sowie ein homogenes und isotropes Gefüge herangezogen. Weiterhin sind die Gesteine durch ein kompaktes Gefüge mit einem geringen Porenvolumen gekennzeichnet. Alle verwendeten Gesteinsproben waren aus größeren Blöcken auf die jeweiligen Probenvolumina zugeschnitten worden.

4.6.2 Gesteine für das spangebende Bohren

Postaer Sandstein

Beim Postaer Sandstein handelt es sich um einen kieselig gebundenen, mittelkörnigen Elbsandstein. Die Entstehungszeit ist in der Kreide, im unteren Turon einzuordnen [5]. Farblich gibt es Erscheinungsformen von weißlich, gelblich bis hin zu einer bräunlichen Färbung. Als charakteristisches Merkmal sind dunkelbraune Eisenhydroxidkonkretionen oder hellgraue kavernöse Einschlüsse zu sehen. Mineralogisch besteht er zum überwiegenden Teil aus Quarz (95,7 Vol. – %) [14], wodurch er eine hohe Abrasivität aufweist. Aus Versuchen am Institut für Geotechnik konnte eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 37,5 MPa ermittelt werden.

Schiefer

Der zu bohrende Schiefer wurde von der Firma RATHSCHECK zur Verfügung gestellt. Die vorherrschenden Bestandteile sind Blattsilikate, die durch eine sehr schwache bis schwache Gesteinsmetamorphose aufgrund tektonischen Druckes entstanden sind.

Allgemein besteht Schiefer aus Sericit (feinkörniger Hellglimmer/Muskovit), Chlorit, Quarz und Kalkspat bzw. anderen Carbonaten [4]. Aus Laborversuchen wurde eine durchschnittliche Druckfestigkeit senkrecht zur Schieferung von $82,5 \text{ MPa}$ ermittelt. Der verwendete Schiefer ist als stark geschichtet und wenig abrasiv einzuordnen.

Kalzitmarmor

Bei dem verwendeten Kalzitmarmor handelt es sich um einen feinkristallinen Kalkstein mit einem Kalziumkarbonatgehalt von über 95 %. Die mittlere einaxiale Druckfestigkeit wurde mit $96,5 \text{ MPa}$ bestimmt. Das Gestein ist schwach geschichtet und besitzt eine geringe Abrasivität.

Freiberger Gneis

Der Freiberger Gneis gehört zur Gruppe der Graugneise, welche den metamorphen Gesteinen zuzuordnen sind. Er besteht aus Feldspaten mit meist hohem Plagioklasanteil sowie Quarz und Glimmer (meistens mehr Biotit als Muskovit). Die deutliche Schieferung dieser Gesteine ist auch bei der Probe gut zu erkennen. Die einaxiale Druckfestigkeit wurde mit 150 MPa ermittelt.

Lausitzer Granit

Beim Lausitzer Granit handelt es sich um ein homogenes, isotropes, mittel- bis grobkörniges Gestein. Die Bestandteile sind dunkelweißer Feldspat (ca. 60 %), Quarz (ca. 25 %) und Biotit (10 %) [3]. Lausitzer Granit hat eine hohe Dichte und eine sehr hohe Druckfestigkeit (etwa 180 MPa). Vergleichsweise wurde ebenfalls Quarzporphyr verwendet, dieser ist gleichwertig zum Granit und wird unter der Bezeichnung Rhyolith noch näher beschrieben.

4.6.3 Gesteine für die Fallwerksversuche

Quarzit

Als hartes und kompaktes Gestein mit einem Quarzanteil von über 90 % wurde ein Tertiärquarzit verwendet. Das Gestein ist auf Grund des hohen Quarzanteils stark abrasiv und kann als monomineralisch bezeichnet werden. Die Druckfestigkeit wurde zu 155 MPa bestimmt.

Rhyolith

Der Rhyolith ist das mineralogische Äquivalent zum Granit. Er ist jedoch durch Auskristallisation einer vulkanischen Schmelze an der Erdoberfläche entstanden. Er besteht

aus Quarz (40 bis 60 %) und Feldspäten. Die einaxiale Druckfestigkeit des Rhyoliths beträgt 236 MPa . Durch den hohen Quarzanteil kann von einer hohen Abrasivität ausgegangen werden.

Gabbro

Als plutonitisches Gestein wurde weiterhin der Gabbro in die Testreihen aufgenommen. Wie der Rhyolith zum Granit stellt auch der Gabbro das mineralogische Äquivalent zum Basalt dar. Bei den Prüfkörpern konnte ein sehr grobkörniges Gefüge festgestellt werden. Die Bestandteile sind Kalknatronfeldspäte (40 bis 70 %) und weiterhin Pyroxene und Quarz [86]. Die einaxiale Druckfestigkeit wurde mit 291 MPa ermittelt.

5 Ergebnisse

5.1 Spanende Versuche

5.1.1 Bohrungsverläufe mit konventionellen Schneidmaterialien

Allgemeine Betrachtungen

Die ersten Bohrversuche fanden mit unterschiedlichen handelsüblichen Schneidmaterialien in sehr unterschiedlichen Gesteinen (z. B. Postaer Sandstein, Kalzitmarmor, Schiefer, Lausitzer Granit und Rhyolith) statt. Aus den aufgezeichneten Werten der Messtechnik wurde jeweils eine einfache Übersicht des gesamten Bohrversuches erstellt, die alle relevanten Parameter enthält. In diesen Diagrammen werden Andruck, Drehmoment, Drehzahl, zurückgelegter Weg in Vorschubrichtung und die Bohrgeschwindigkeit als berechnete Größe visualisiert. Fehlerquellen oder unvollständige Bohrdaten sind in diesen Diagrammen schnell erkennbar. Zum besseren Verständnis der Gesteinszerstörungsmechanismen wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen während des Bohrens von verschiedenen Gesteinen gemacht, welche die unterschiedlichen Lösevorgänge dokumentieren. Hierbei wurden kurze Abschnitte einer Bohrung im jeweiligen Gestein aufgenommen. Die Ausgangsbohrungen wurden seitlich geöffnet, um einen Einblick auf die Bohrlochsohle zu ermöglichen. Die Aufnahmegeschwindigkeit der Kamera betrug 1000 Bilder pro Sekunde.

Postaer Sandstein

Beim ersten untersuchten Gestein handelte es sich um Postaer Sandstein. Wie in einem exemplarischen Bohrverlaufdiagramm (Abb. 5.1) sowie im Anhang A.1 zu sehen, schwankt die Bohrgeschwindigkeit um 8 mm/s .

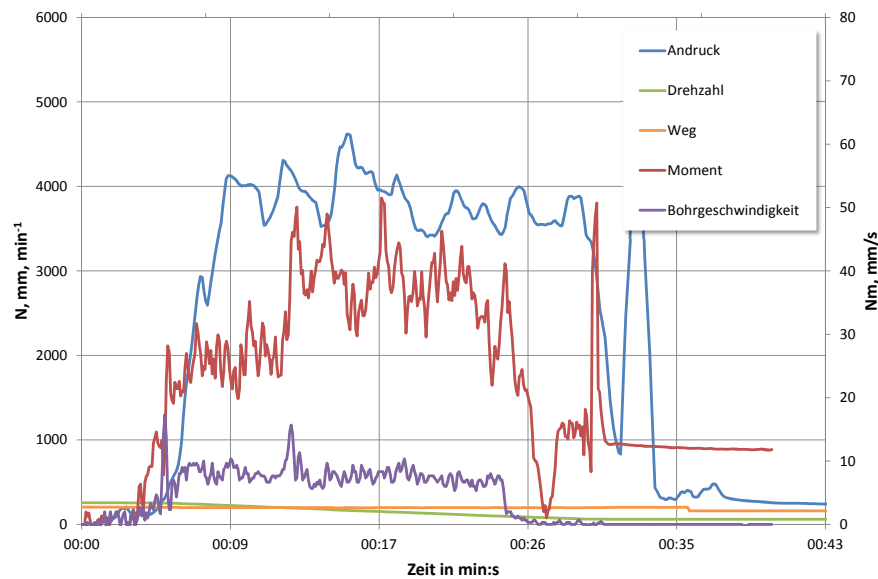


Abb. 5.1: Bohrverlaufdiagramm für Postaer Sandstein

Bei der Zerspanung des Sandsteins (Abb. 5.2) werden die einzelnen Quarzkörner aus dem Bindemittel herausgelöst. Die Zerstörung des Bindemittels, Kalziumkarbonat, setzt der Schneide einen geringeren Widerstand entgegen, als die einzelnen Mineralkörner. Gut zu erkennen sind ganze Körner und auch Ansammlungen von Körnern, die als Verband gelöst werden. Durch die geringe Druckfestigkeit des Sandsteins konnten die Schneiden schon bei geringen Andruckkräften eindringen und einen Spanvorgang etablieren. Dennoch kann das Lösen des Sandsteins nicht mit einem gut plastisch verformbaren Stoff verglichen werden. Die Schneiden folgen dem eingangs erwähnten Mechanismus (Kapitel 3.3.1). Während des Auftreffens auf die Gesteinskörner baut sich an der Schneide potenzielle Energie auf. Im Verlauf des Lösevorganges wandelt sich diese dann in kinetische Energie um und löst das Korn aus dem Verband. Bei Sandstein ist dieses Energieaufbauen und Entspannen nur in sehr kleinen Amplituden um die Mittlere Spannung herum zu verfolgen. Der Verschleiß an den Wendeschneidplatten war durch den hohen Quarzanteil spürbar und wurde als Vergleichskriterium zu den anderen erbohrten Gesteinen verwendet.

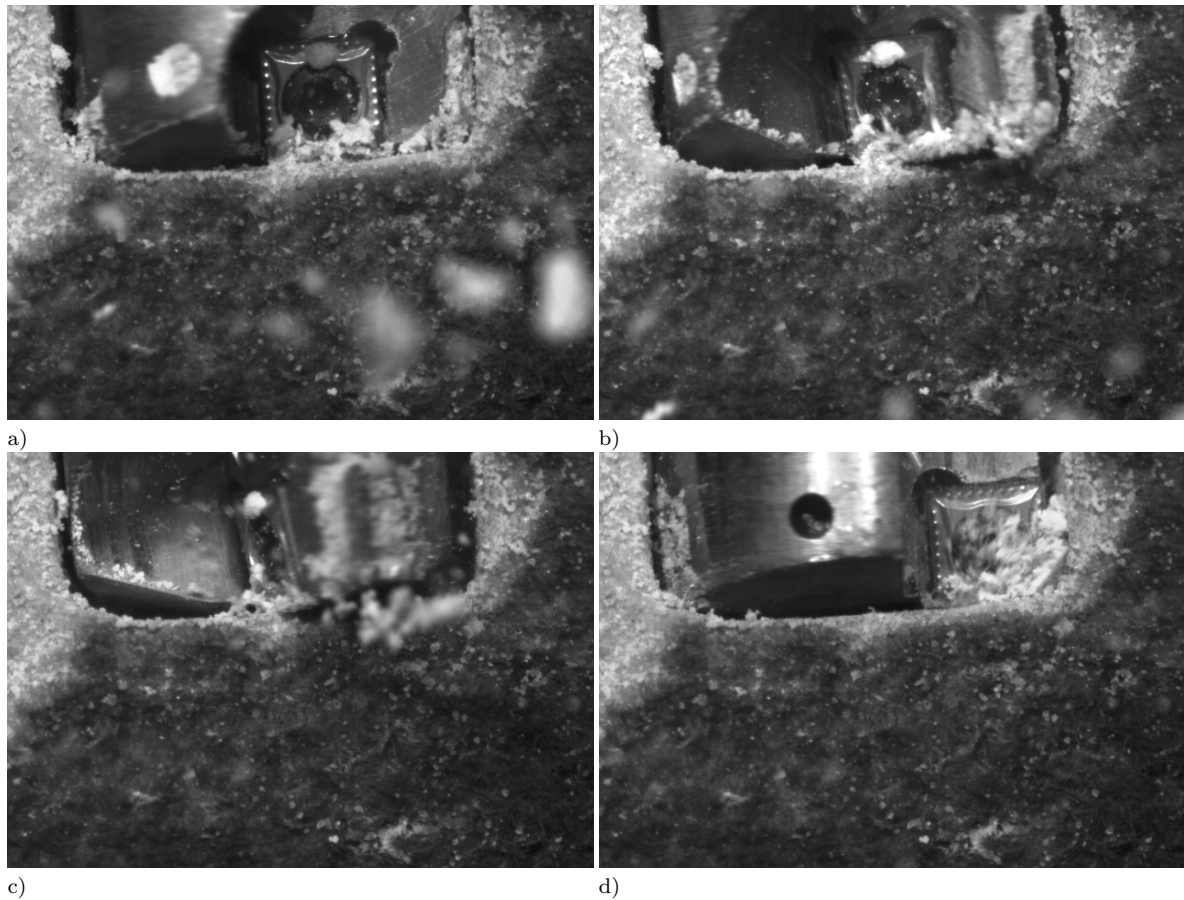


Abb. 5.2: Zerspanen von Postaer Sandstein bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 2200 N

Schiefer

Der Gesteinszerstörungsmechanismus im Schiefer ist sehr stark von dessen Schichtung abhängig. Die eingesetzte Probengröße und deren Verspannung auf dem Maschinentisch gab den Ausschlag, senkrecht zur Schieferung zu bohren. Wie in Abb. 5.3 zu erkennen, stellte sich während des Bohrvorganges ein gleichbleibendes Reaktivmoment ein. Die Bohrgeschwindigkeit unterlag kaum Schwankungen. Änderungen in der Schieferung konnten direkt am Verlauf der aufgezeichneten Werte festgemacht werden, z. B. in Form von Drehmomentsprüngen.

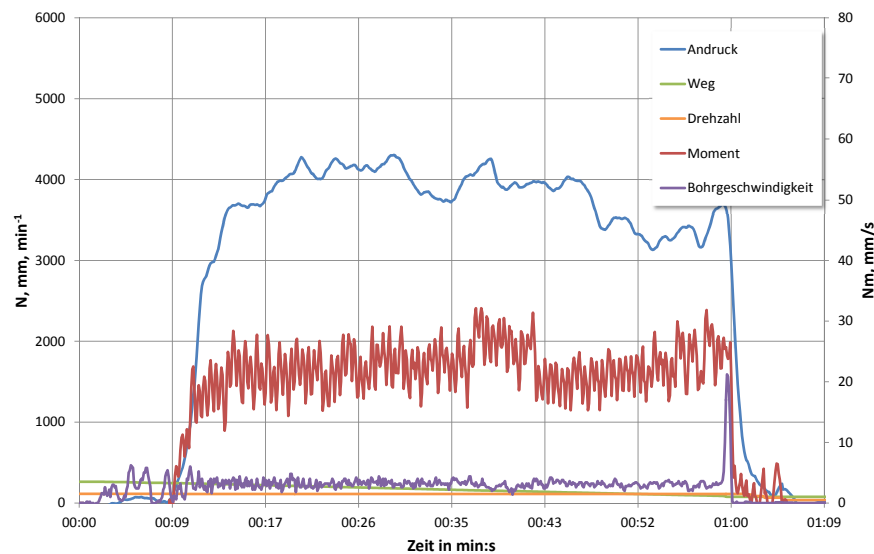


Abb. 5.3: Bohrverlaufdiagramm für Schiefer

Das kontinuierliche Spanverhalten konnte durch die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, Abb. 5.4, bestätigt werden. Der Spanvorgang stellte sich nach kurzer Einschnittzeit ein und ermöglichte große Schnittiefen. Beim Lösevorgang wurde der Schiefer plattenartig entlang der Schieferung aufgetrennt. Diese einzelnen Platten sind deutlich in Abb. 5.4 b) zu erkennen. Weiterhin ist die Entstehung des Bohrkleins in Folge der inneren Schneide bei höherer Andruckkraft zu erkennen. Hier wird deutlich, dass sowohl Chips, als auch zermahlenes Schiefergestein entstand. Die äußere Schneide bildete bei annähernd gleicher Andruckkraft mehr Chips als die Innenschneide. Dies wird beim Vergleich der Einzelbilder deutlich erkennbar. Am linken Bildrand ist dabei zu erkennen, wie die Schichtungsrichtung des Schiefers das Bilden von Gesteinschips unterstützt. Im Zuge der Bohrversuche in Schiefer konnte ein sehr geringer Verschleiß ermittelt werden. Die Bohrverlaufdiagramme sind im Anhang A.2 auf Seite 161 hinterlegt.

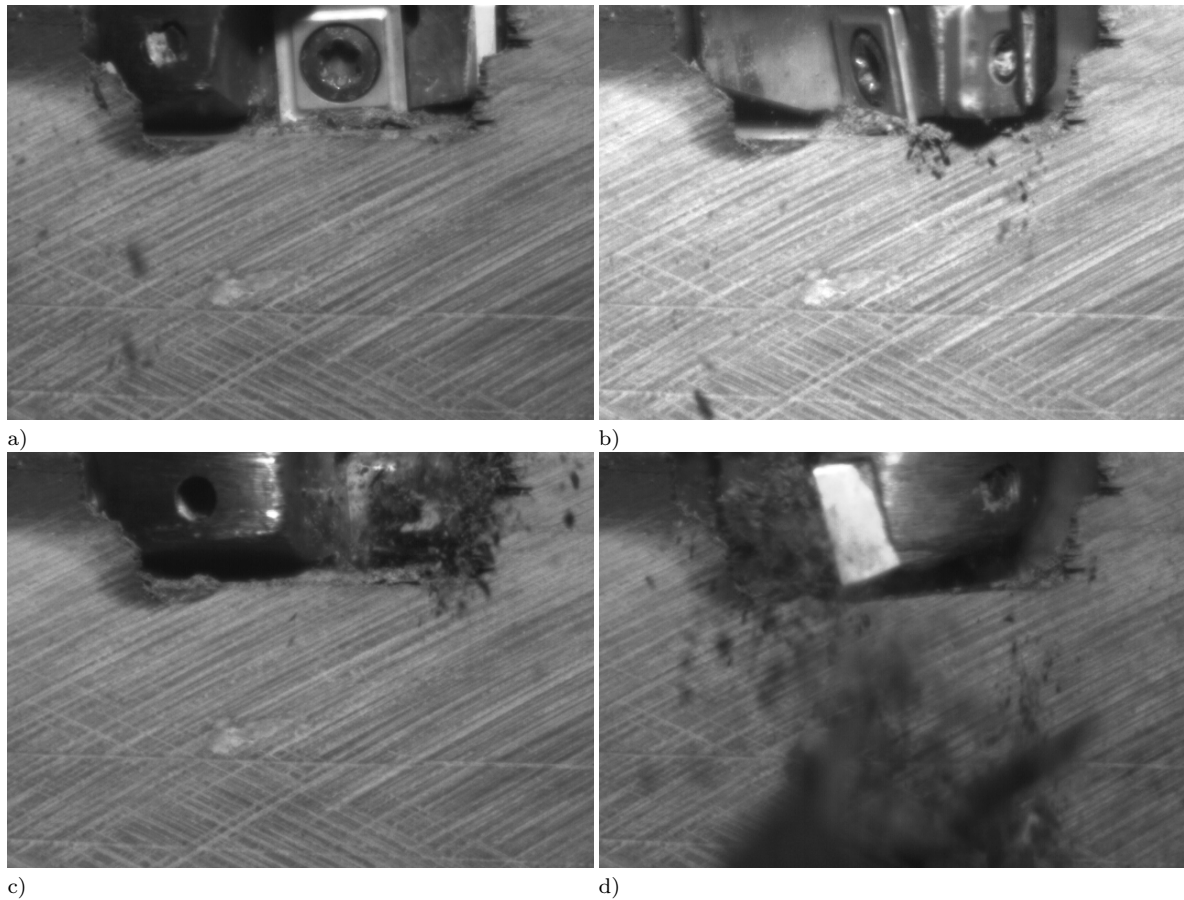


Abb. 5.4: Zerspanen von Schiefergestein bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 2500 N

Kalzitmarmor

Der Kalzitmarmor erwies sich als ein spanend leicht zu bohrendes Gestein. Bei den Versuchen unter gleichbleibenden Bedingungen war jedoch festzustellen, dass das Bohrklein in Verbindung mit der Wasserspülung eine klebrige Verbindung bildete, welche die Reinigung der Bohrlochsohle negativ beeinflusste. Die Andruckkräfte verursachten verhältnismäßig hohe Reaktivmomente im Vergleich zum Schiefer (vgl. Abb. 5.5). Die einzelnen Inhomogenitäten, welche teilweise von den Lösemethoden (Bohren und Sprengen) der Proben her rühren, sind durch die Sprünge bei Andruck und Drehmoment gut erkennbar, vgl. Anhang A.3.

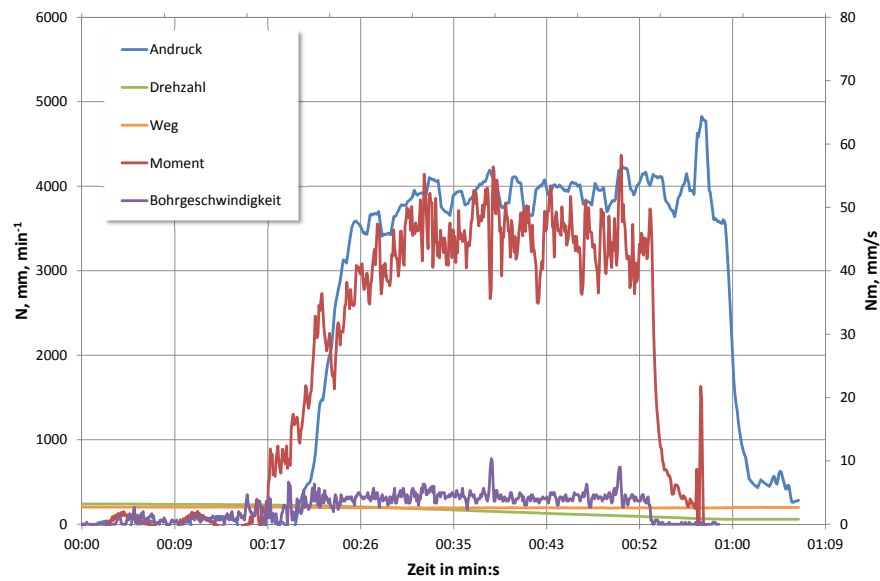


Abb. 5.5: Bohrverlaufdiagramm für Kalzitmarmor

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Abb. 5.6 c) und d)) zeigen beim Lösevorgang deutlich vereinzelte, größere Chips. Zudem ist vor der Schneide erkennbar, dass überwiegend sehr feines Bohrklein entsteht. Dies wird in Folge des negativen Spanwinkels in Richtung der Drehbewegung und nach oben weg von der Schneide befördert. Bei diesem Gestein ist deutlich die Schneidqualität des Werkzeugs zu erkennen. Nach dem Wiegen der Schneidelemente nach dem Bohrvorgang wurde der Kalzitmarmor als schwach abrasiv eingestuft.

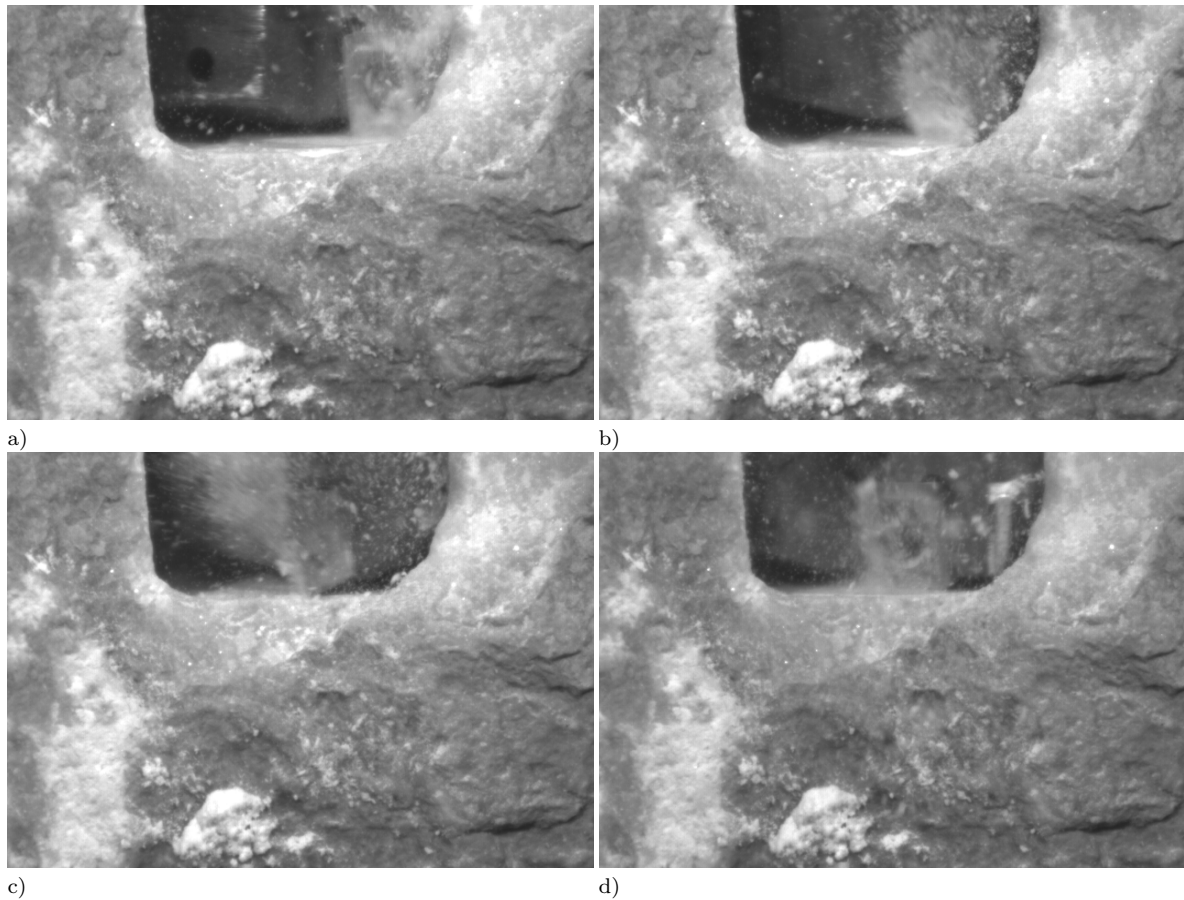


Abb. 5.6: Zerspanen von Kalzitmarmor bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 3000 N

Lausitzer Granit

Der Lausitzer Granit zeigte bei den spanenden Bohrungen den größten Widerstand gegen das Bohrwerkzeug. Er gilt als ein sehr abrasives Gestein mit einer hohen ein-axialen Druckfestigkeit. Bei der Analyse der Videoaufzeichnung ist, im Verhältnis zu den anderen Gesteinen, ein deutlicher Unterschied in der Dynamik des Bohrvorganges zu erkennen. Innerhalb eines Schnittvorgangs rotierte das Bohrwerkzeug ruckartig. Dies ist ein Hinweis auf das elastisch spröde Bruchverhalten das bei Granit sehr stark ausgebildet ist. In der Abb. 5.8 sind vier Bilder einer Umdrehung der Außenschneide abgebildet. In der gesamten Abb. sind kaum, oder nur sehr kleine Chips zu erkennen. Das Gestein wird förmlich zermalmt. Dies ist in der geringen Eindringtiefe aufgrund der Härte des Granits begründet. In Abb. 5.8 c) und d) ist zudem zu erkennen, dass Gesteinsmehl im Bereich des Freiwinkels herausgedrückt wird, was das Drehmoment erhöht. Offenbar war bei diesem Versuch die Andruckkraft zu gering.

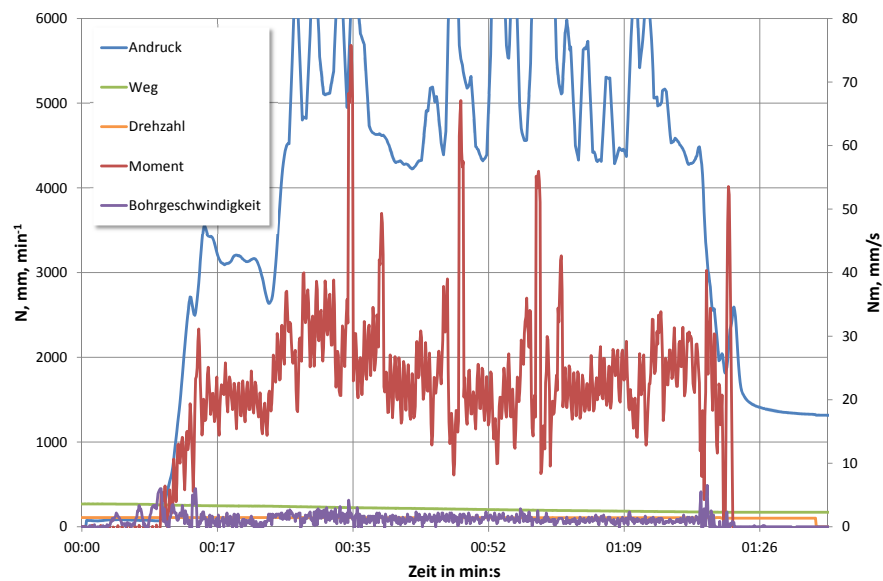


Abb. 5.7: Bohrverlaufdiagramm für Lausitzer Granit

Der Granit besitzt im Vergleich zu Sandstein eine wesentlich größere Härte als auch eine höhere einaxiale Druckfestigkeit. Beim Zerstören des Granits werden, wie aus den Aufnahmen ersichtlich, die einzelnen Bestandteile nicht nur an ihren Korngrenzen gelöst. Es bilden sich auch transkristalline Risse durch die einzelnen Mineralkörner hindurch. Somit kann der wesentlich höhere Energieaufwand begründet werden. Die benötigten Andruckkräfte (Abb. 5.7 und Anhang A.5 Seite 176) für ein Zerspanen von Granit waren wesentlich höher als bei Sandstein. Im Gegensatz zu diesem setzte auch der Verbund der Mineralkörner dem Bohrvorgang einen stärkeren Widerstand entgegen. Trotz hoher Andruckkräfte konnte der Bohrvorgang nicht eindeutig in die Zone der volumetrischen Gesteinszerstörung gebracht werden.

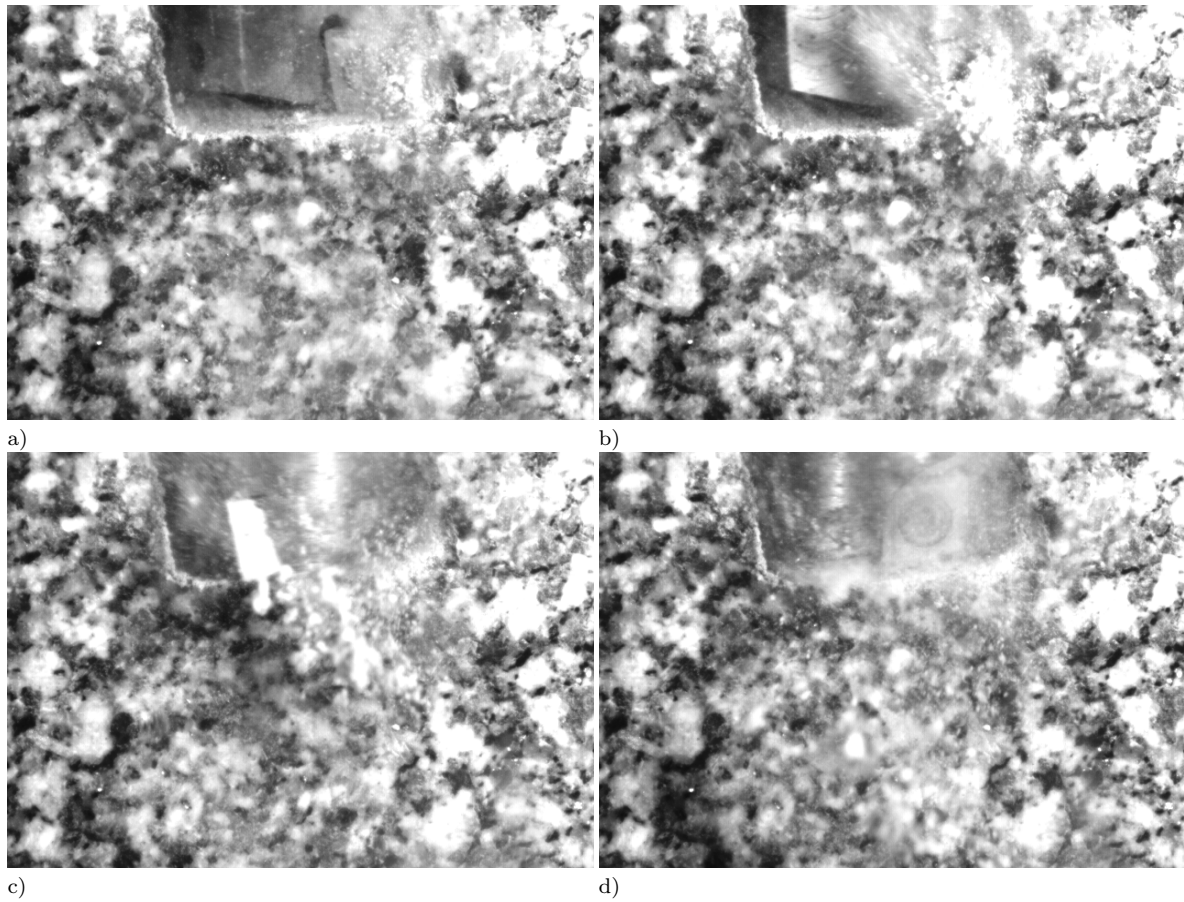


Abb. 5.8: Zerspanen von Lausitzer Granit bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 3800 N

Rhyolith

Zur Beurteilung des Korngrößeneinflusses wurde ein Bohrversuch mit einem feinkörnigen Rhyolith (Quarzporphyr) durchgeführt. Das Bohrverlaufdiagramm ist in Abb. 5.9 zu sehen. Hierbei fallen die sehr hohen Kraftspitzen und Reaktivmomente ins Auge. Diese begründen sich aus der höheren einaxialen Druckfestigkeit im Vergleich zum Granit.

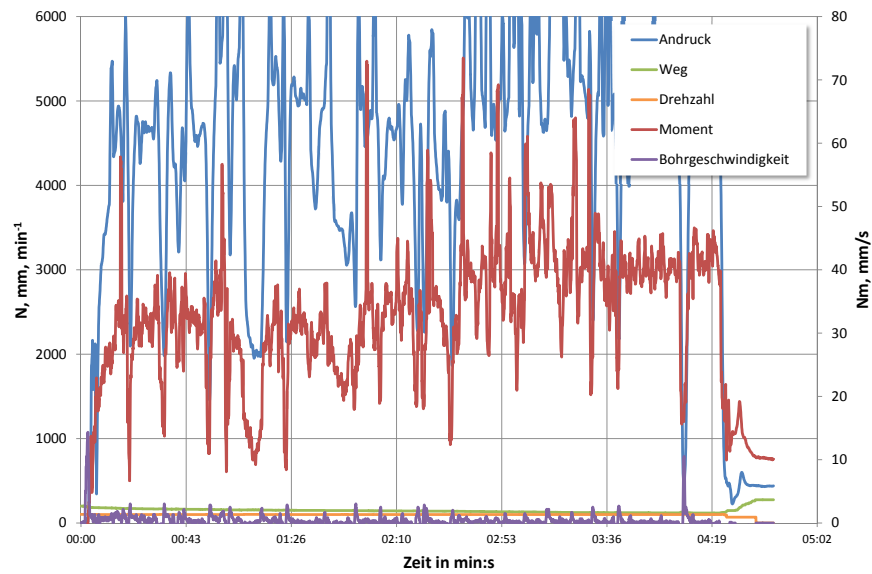


Abb. 5.9: Bohrverlaufdiagramm für Quarzporphyr

Da sich die Korngrößen der einzelnen Minerale sehr stark auf die Zerstörungsmechanismen auswirkten, wurden im Anschluss Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit dem Rhyolith durchgeführt. Ziel war es, Aussagen über den Zusammenhang von Schneiden- zu Mineralkorngröße zu erhalten. Die feinere Verteilung der Minerale macht das Gefüge sehr stabil. Die aufzubringenden Andruckkräfte waren somit höher und der Verschleiß an den Wendeschneidplatten lag nach ersten Versuchen viermal höher als beim grobkörnigeren Granit. Maßgebend für den hohen Verschleiß waren die aufzubringenden Andruckkräfte und der hohe Quarzanteil in diesem Gestein.

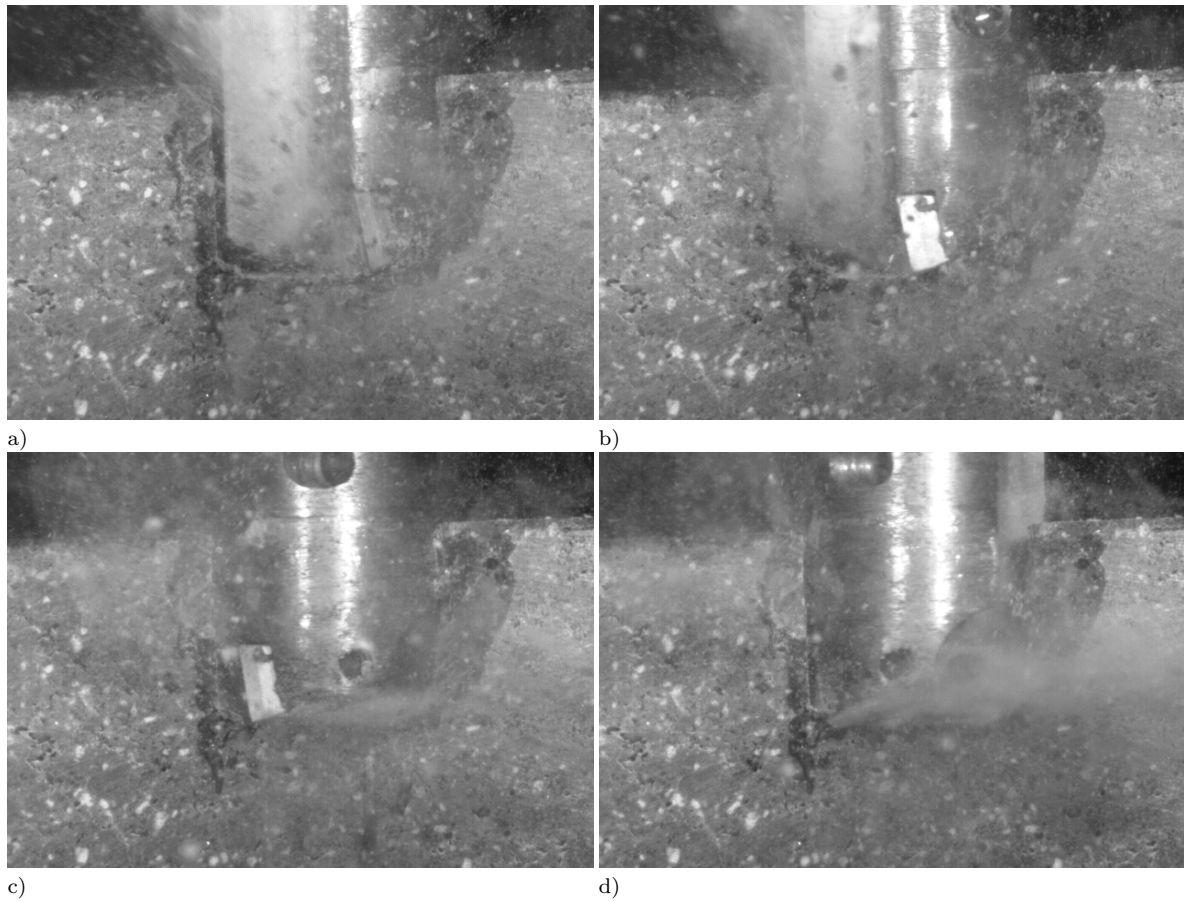


Abb. 5.10: Zerspanen vom Quarzporphyr bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 4600 N

Freiberger Gneis

Nach der Untersuchung von Granit und Rhyolith wurde nach einem Gestein mit einer höheren Druckfestigkeit als Kalzitmarmor und etwas unter der von Granit gesucht. Als weiteres Merkmal sollte auch ein hoher Anteil an schließenden Materialien enthalten sein. Zu diesem Zwecke wurden Versuche mit einem Freiberger Gneis angeregt. Ein Bohrverlaufsdigramm ist in Abb. 5.11 verdeutlicht die hohen Andruckkräfte und die sich einstellenden Reaktivmomente.

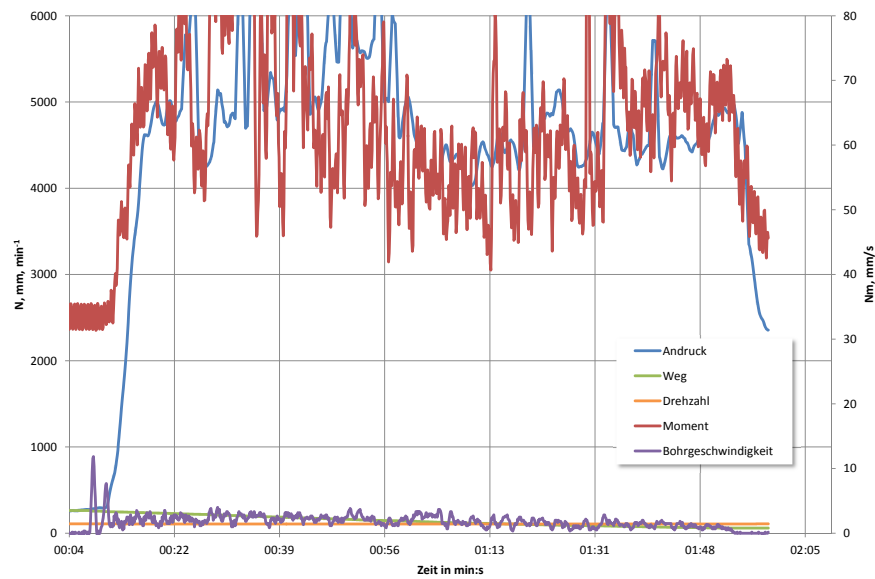


Abb. 5.11: Bohrverlaufdiagramm für Freiburger Gneis

Durch die ausgeprägte Schichtung des Materials konnte ein ungleichmäßiger Spanvorgang erzeugt werden, vgl. Abb. 5.12. Die transkristalline Zerspanung des Gneises in Verbindung mit dem schichtartigen Abtrag führten zu sehr hohen Drehmomenten am Bohrwerkzeug, siehe Anhang A.4 auf Seite 173. Eine volumetrische Zerspanung konnte somit noch nicht erreicht werden. Da die Andruckkräfte für ein Eindringen der Schneiden in das Gestein geringer als beim Granit waren, sind tendenziell Aussagen zu Flächenpressungen und spez. Energien möglich.

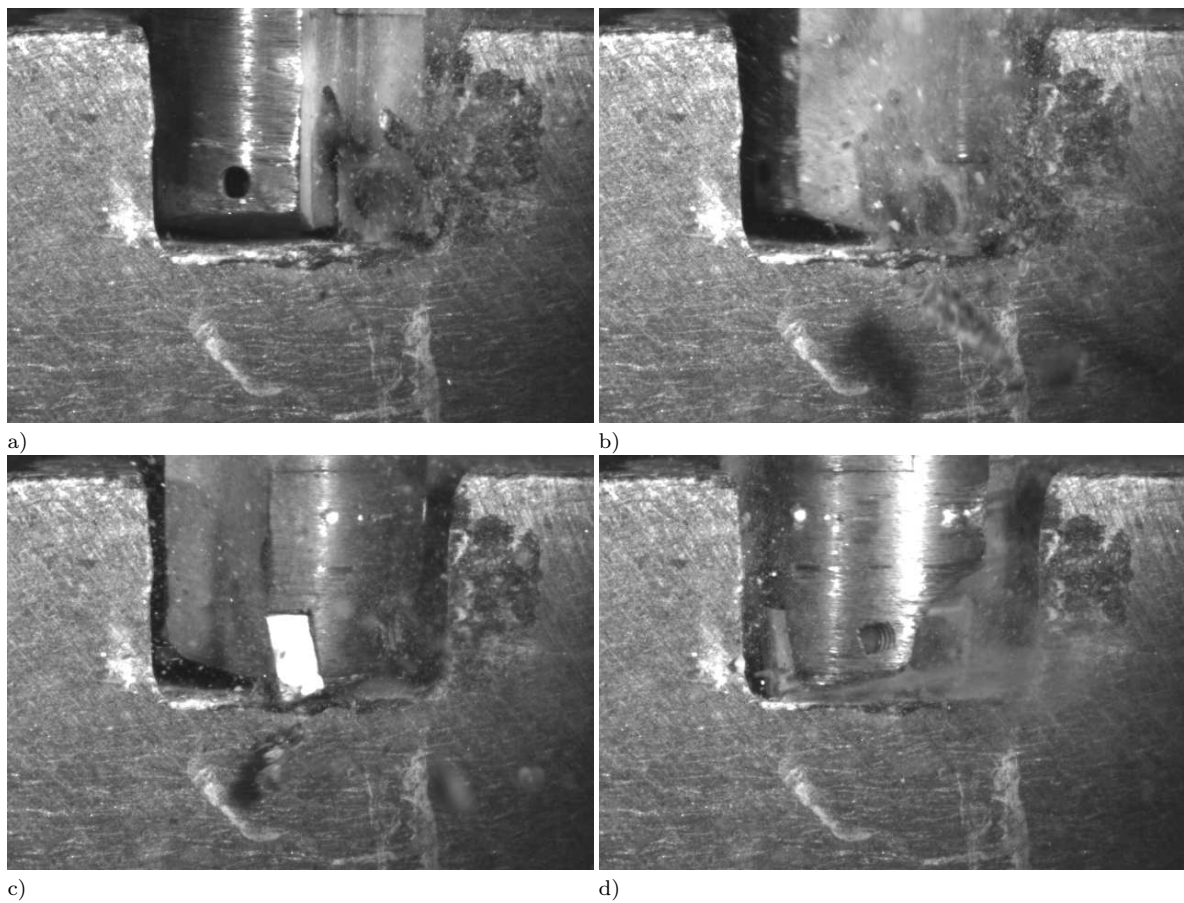


Abb. 5.12: Zerspanen von Freiberg Gneis bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 3500 N

5.1.2 Beschreibung der Ausgangsdaten zur Auswertung

Aus den einzelnen Bohrprotokollen können unter Zusammenschluss der Messdaten grundlegende Aussagen über das Zerspanungsverhalten von Gestein in Bezug auf die eingesetzten Zerstörungsenergie getroffen werden. Als Basis wurden die Werte beim kontinuierlichen Bohren für Sandstein, Kalzitmarmor, Schiefer, Gneis und Granit genutzt. Anfangsfluktuationen beim Anbohren und beim Stoppen des Bohrvorganges werden nicht betrachtet. Die Gesteinsfestigkeiten und der Materialabtrag an den Schneidplatten nach erfolgtem Bohren sind ebenfalls verwertbar.

5.1.3 Andruckkräfte und Schnitttiefen

Während des Gesteinsbohrvorganges ist einer der wichtigsten Parameter der Andruck des Werkzeugs auf die Bohrlochsohle. Beim spanenden Verfahren muss die Schneide in der Lage sein, in das Gestein einzudringen, um die angestrebte Schnittkraft auf eine Materialkante im Gestein wirken zu lassen. Wie in Abb. 5.13 gezeigt, führen höhere Andruckkräfte bei gut spanbaren Gesteinen zu einer höheren Schnitttiefe. Im Falle

des Granits konnte der Bereich der volumetrischen Gesteinszerstörung nicht erreicht werden, da die Schnitttiefen trotz steigenden Andrucks nicht zunehmen.

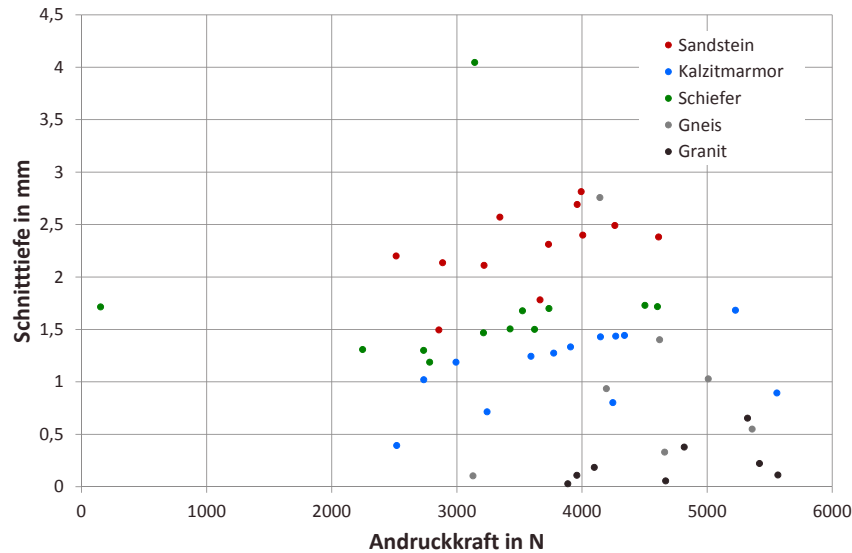


Abb. 5.13: Schnitttiefe als Funktion der mittleren Andruckkräfte für unterschiedliche Gesteine

Da in der Praxis unterschiedliche Schneidenanordnungen an den Bohrwerkzeugen vorliegen, ist die Angabe der Flächenpressung unter den Schneiden in Bezug auf eine allgemeingültige Aussage zielführend. Hierbei lassen sich allgemein die Flächenpressung unter und vor den Schneiden unterscheiden. Die Pressung unter den Schneiden ist der Quotient aus der Andruckkraft und der projizierten Fläche unter den Schneidelementen. Zur Berechnung der Drücke vor den Schneiden wird analog mit dem Drehmoment, der daraus abgeleiteten Schnittkraft, der Schnitttiefe sowie den Schneidenlängen verfahren. Die Steuerung der Bohrvorgänge in der Praxis erfolgt über den Andruck. Die Initiierung des Bohrvorganges ist vom Eindringen der Schneiden in das Gestein abhängig. In Abb. 5.14 können somit maßgebliche Aussagen über die zu erwartenden Schnitttiefen in unterschiedlichen Gesteinen abgelesen werden.

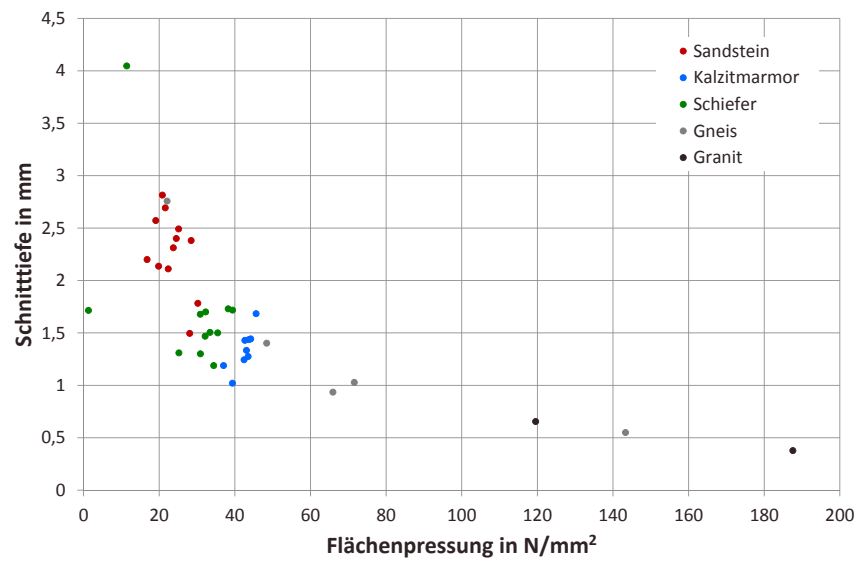


Abb. 5.14: Abhängigkeit der Schnitttiefe von der Flächenpressungen unter den Schneiden für unterschiedliche Gesteine

5.1.4 Spezifische Energien

Aus den Messgrößen lassen sich der Leistungsumsatz am Bohrwerkzeug und die erbohrten Volumina bestimmen. Schlussendlich kann die spezifische Energie (e_{spez}) zu jedem Zeitpunkt des Versuches nach Formel (3.7) auf Seite 59 ermittelt werden. Die Ergebnisse für unterschiedliche Bohrungen stellen sich wie im folgenden Diagramm (Abb. 5.15) dar.

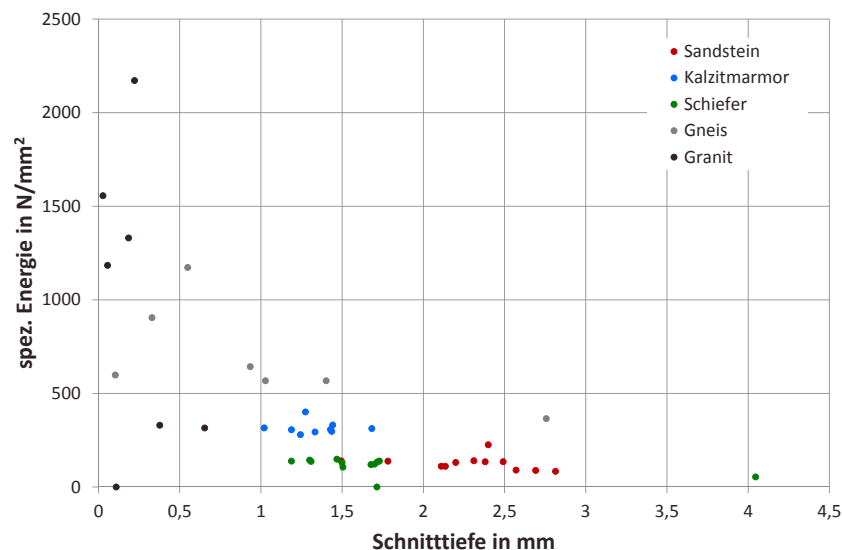


Abb. 5.15: Spezifische Energie in Abhängigkeit der erreichten mittleren Schnitttiefen für unterschiedliche Gesteine

Die folgenden Grundsätze können aus den bisher berechneten Werten abgeleitet werden.

- Mit steigender Druckfestigkeit der Gesteine erhöht sich deren Eindringwiderstand.
- Durch Erhöhung der Andruckkraft / Flächenpressung erhöht sich die zu erwartende Schnitttiefe.
- Die spezifische Energie sinkt mit steigender Schnitttiefe.
- Bei gut spanbaren Gesteinen strebt die spezifische Energie einem Grenzwert zu.

Zur Ermittlung der spezifischen Energie aus den bereits getätigten Bohrversuchen wurde ebenfalls der Einfluss der Drehzahl des Werkzeugs mit untersucht. Je nach Gestein wurden 100, 200 oder 300 U/min als Bohrparameter gewählt. Im Falle des Granits stellten sich starke Schwingungen ein, 200 U/min wurden deshalb aus Sicherheitsgründen nicht überschritten. Die Abb. 5.16-5.25 verdeutlichen die Auswertungen. Die ermittelten Werte in Bezug auf die Andruckkräfte und die spezifischen Energien wurden für unterschiedliche Bohrversuche aufgetragen. Durch Umrechnung der Andruckkraft in die vorherrschende Flächenpressung während der Versuche und gleitenden Mittlung der sehr umfangreichen Datenbasis, sind die spezifischen Energien ablesbar. Speziell der Granit lieferte keine eindeutigen Ergebnisse, was auf den diskontinuierlichen Gesteinslösevorgang zurückzuführen ist.

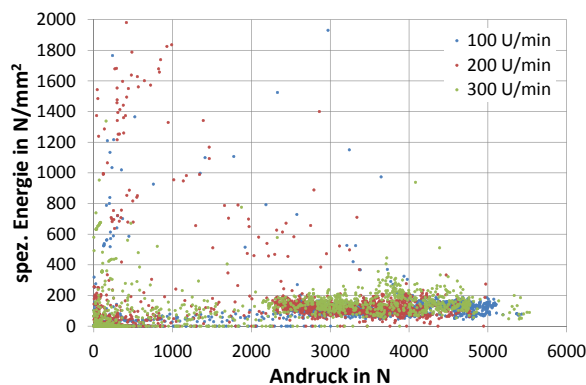


Abb. 5.16: Ermittelte spez. Energien für Sandstein bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften

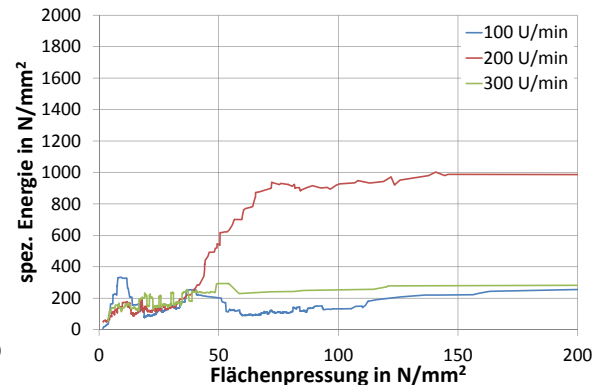


Abb. 5.17: Spez. Energien für Sandstein bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte

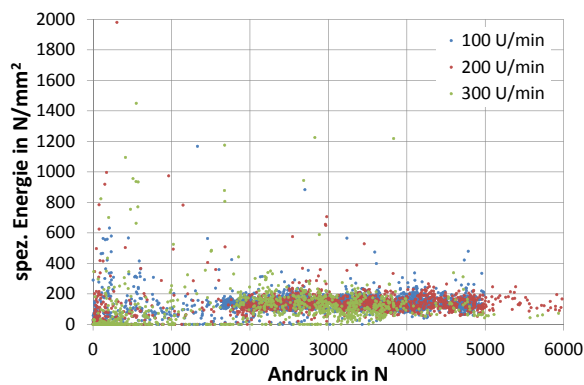


Abb. 5.18: Ermittelte spez. Energien für Schiefer bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften

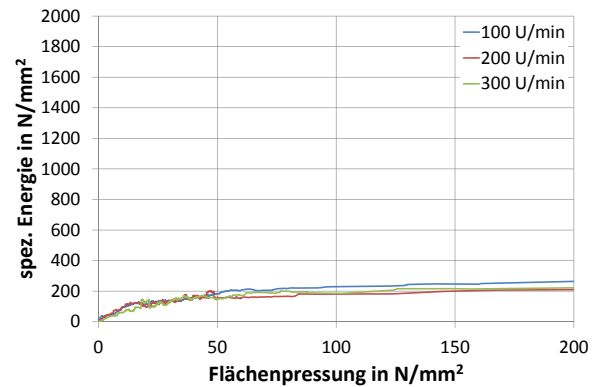


Abb. 5.19: Spez. Energien für Schiefer bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte

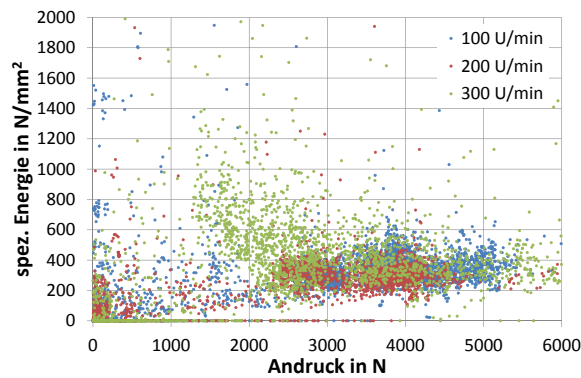


Abb. 5.20: Ermittelte spez. Energien für Kalzitmarmor bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften

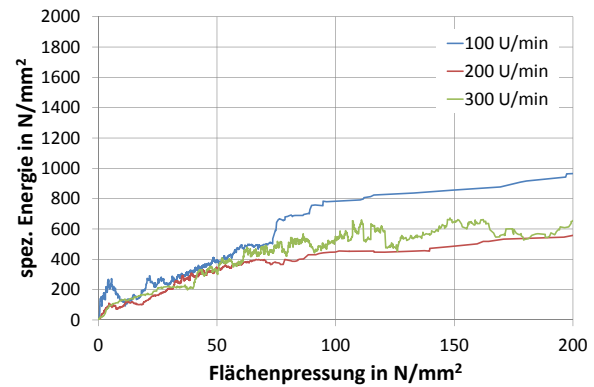


Abb. 5.21: Spez. Energien für Kalzitmarmor bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte

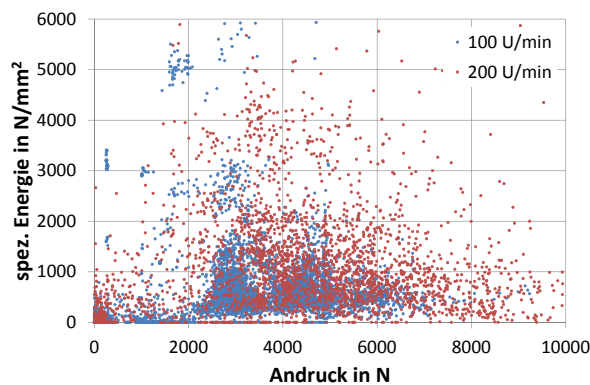


Abb. 5.22: Ermittelte spez. Energien für Gneis bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften

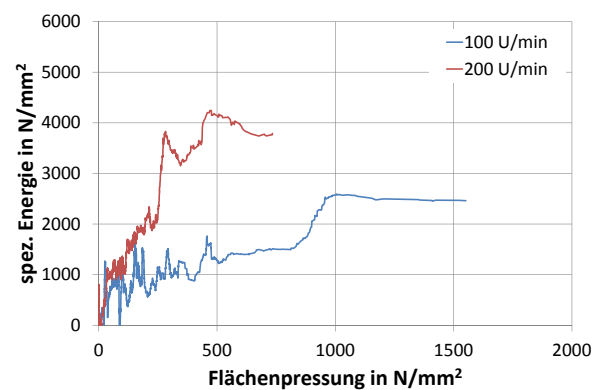


Abb. 5.23: Spez. Energien für Gneis bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte

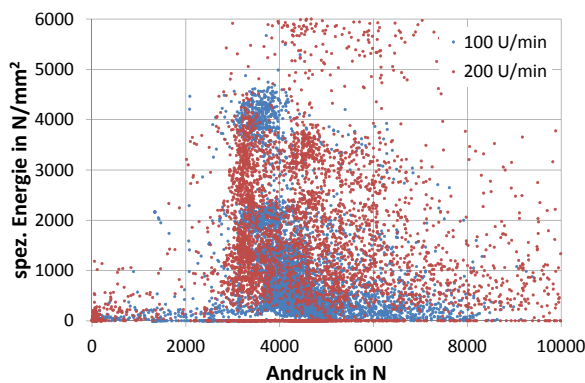


Abb. 5.24: Ermittelte spez. Energien für Granit bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften

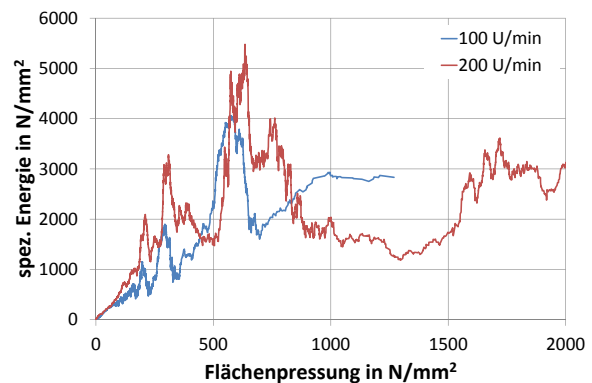


Abb. 5.25: Spez. Energien für Granit bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte

Die aus den Versuchen gewonnen spezifischen Energien (Tab. 5.1) geben eine Auskunft über die spanende Bohrbarkeit der untersuchten Gesteine. TEALE [91] ermittelte unter atmosphärischen Bedingungen die spezifische Energie im Bereich der einaxialen Druckfestigkeit des jeweiligen Gesteines. Die Abweichungen der im Labormaßstab ermittelten Werte und Daten aus dem Feld begründen sich durch unterschiedliche Bruchformen der Gesteine sowie variable Bohrparameter, wie auch schon Untersuchungen von RABIA [75, 76] bestätigen.

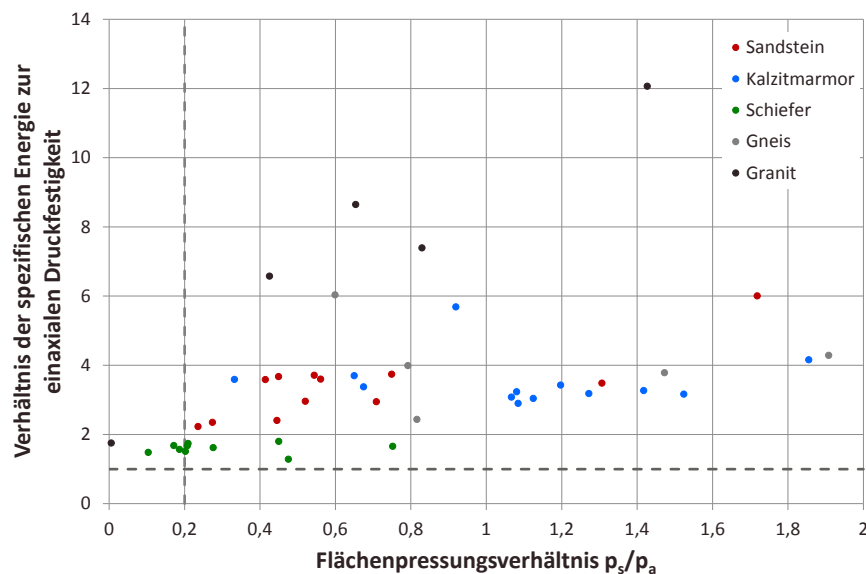
Tab. 5.1: Streuung der mittleren spez. Energien aus den Bohrversuchen

Bezeichnung	spez. Energie in N/mm^2
Sandstein	83,50 – 225,22
Schiefer	105,93 – 148,33
Kalzitmarmor	279,63 – 551,56
Gneis	365,23 – 1172,90
Granit	315,18 – 2171,37

Die Schlussfolgerungen von BELOHLAVEK [14] stellen eine Korrelationen zwischen den Druckfestigkeiten und den spezifischen Energien her. Auf Basis dieser Erkenntnis sollte es möglich sein, eine Aussage über die Effektivität des Bohrvorganges und die Zerspanbarkeit des Gesteines zu treffen. Die Werte für die spezifische Energie geteilt durch die Druckfestigkeit des jeweiligen Gesteines kann als bezogene spezifische Energie bezeichnet werden.

Für spanende Verfahren stellt das Verhältnis von Schnitt- zu Eindringwiderständen ein aussagekräftiges Kriterium zur Beurteilung der Effektivität des Bohrverfahrens, ähnlich dem Spanungsverhältnis, welches auf geometrischen Grundlagen beruht, dar. Da die auftretende Scherspannung, welche beim Spanen genutzt wird, geringer als die Druckfestigkeit des Gesteins ist, werden auch geringere Flächenpressungen in Schnittrichtung als in Vorschubrichtung benötigt. Dennoch muss die Druckfestigkeit des Ge-

steins in Vorschubrichtung von den Schneiden überwunden werden, um den Schneidprozess weiter aufrecht zu erhalten. Als weiterer Einfluss auf den Schneidvorgang sind noch Reibwiderstände an den Schneiden in Folge der Bewegung über die Gesteinsoberfläche mit einzubeziehen. Nach BHUSHAN [17] können während des Spanvorganges Reibbeiwerte (μ) von TiCN/TiN Legierungen mit 0,16 und für Wolframcarbid mit 0,2 angenommen werden, ähnliche Werte wurden von AZAR [12]. Ein Verhältnis der Flächenpressungen vor und unter den Schneiden kann somit eine Aussage über die sinnvolle geometrische Gestaltung der Schneidorgane liefern. Folgend ist ebenfalls der Umsatz von Vorschub- zu Schnittkräften ablesbar. Da die Druckfestigkeit bei spröden Gesteinen wesentlich höher als die Scherfestigkeit ist, stellt sich der Quotient der Flächenpressungen je nach Anstellung der Schneiden in einem bestimmten Bereich ein. Je geringer dieses Verhältnis ist, um so günstiger ist der Energieumsatz in Schnittrichtung, vergl. Abb. 5.26.



Im versuchstechnisch günstigen Fall stellt sich dieser Quotient bei einem Wert ein. Als Gegenbeispiel fungieren wiederum Gneis und Granit (Abb. 5.26), welcher keinen mit dem Versuchsaufbau ermittelbaren einheitlichen Spanzyklus aufweist. Die spezifische Energie steigt somit weiter an, ohne ein finales Niveau zu erreichen. Durch die Kombination von bezogenen spezifischen Energien und den Flächenpressungsverhältnissen kann eine Optimierung zwischen dem Gestein und den Werkzeugparametern erfolgen.

5.1.5 Verschleißverhalten getesteter Materialien

Die Untersuchungen bezüglich des Verschleißes sind als Prüfstandversuche mit kompletter Maschine zu bewerten. hierbei wurden die Schneidplatten vor und nach dem Bohrvorgang gewogen und somit die Massenverluste bestimmt. Bei gut spanbaren und wenig abrasiven Gesteinen, wie dem Kalkstein, stellte sich erst nach mehreren Bohrungen ein nennenswerter Verschleiß ein. Um die unterschiedlichen Verschleißraten zu vergleichen, wurden die ermittelten Massenverluste auf die erbohrten Volumina bezogen. Wie in Abb. 5.27 verdeutlicht, ist der Bereich je nach aufgebrachtener Flächenpressung unter der Schneide sehr weit gefächert. Der hohe Verschleiß beim Bohren von Granit hat seine Ursache im ineffizienten Spanvorgang.

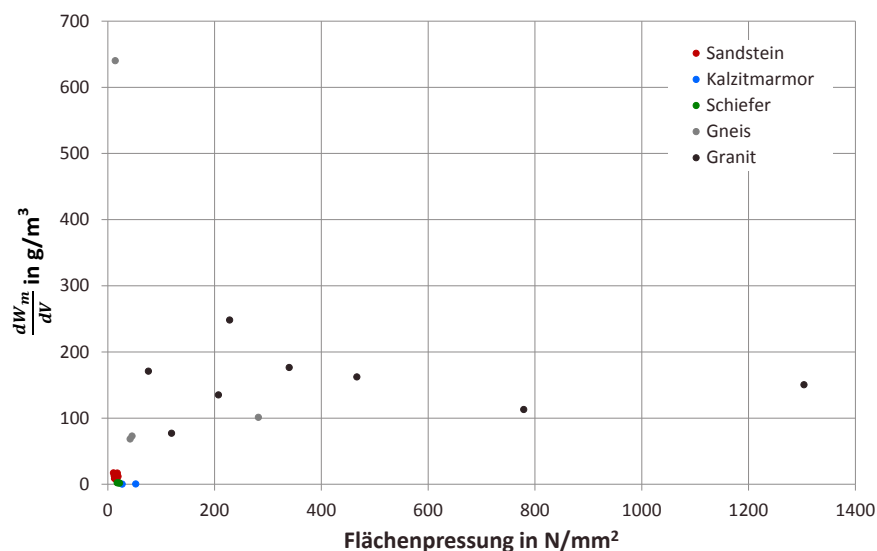


Abb. 5.27: Verschleißraten (dW_m/dV) konventioneller Schneidplatten mit TiCN/TiN Beschichtung für die getesteten Gesteine

Die detailliertere Abb. 5.28 stellt den linken unteren Bereich näher dar. Im Falle des Sandsteines wurden geringe Pressungen unter den Schneiden während des Bohrvorganges erreicht. Gleichzeitig kam es durch die abrasiven Bestandteile zu einer Verschleißrate von maximal 17 g/m^3 . Die Einheit gibt jeweils den Massenverlust in Gramm pro Kubikmeter erbohrtem Gestein wieder. Die Verschleißraten von Schiefer und Kalzitmarmor konnten deutlich darunter eingeordnet werden.

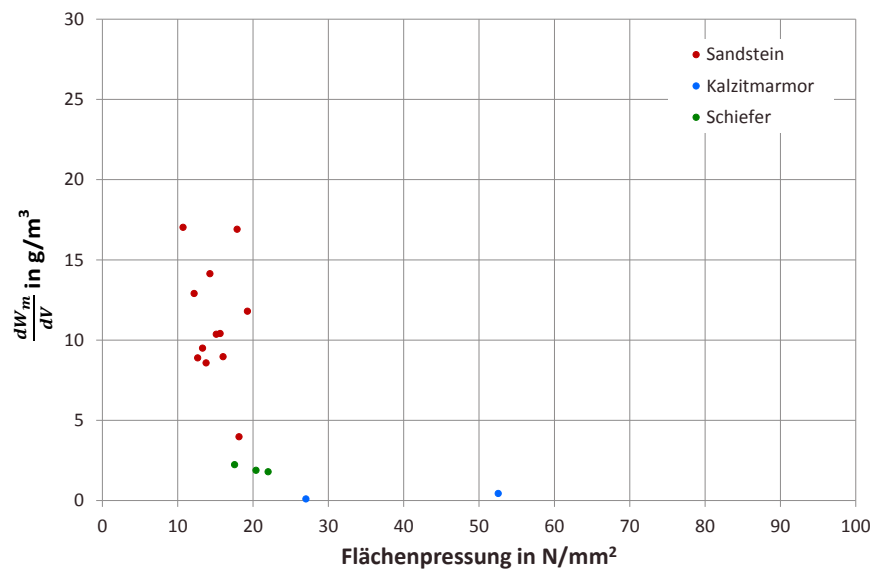


Abb. 5.28: Verschleißraten konventioneller Schneidplatten mit TiCN/TiN Beschichtung für Sandstein, Kalzitmarmor und Schiefer

Die Ursachen für den beobachteten Verschleiß waren vor allem in den unterschiedlichen Gesteinseigenschaften und den sich einstellenden Mechanismen zu sehen. Der abrasive Materialverlust an den Schneidkanten stellte bei den Versuchen das zu erwartende Verschleißbild dar. Dieses fiel je nach Anteil an schleißscharfen Mineralien und den Bohrparametern unterschiedlich stark aus, Abb. 5.29 und 5.30.

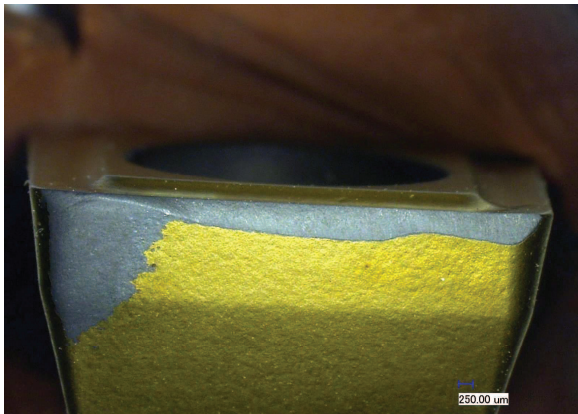


Abb. 5.29: Abrasiver Verschleiß an einer Schneidplatte im Außenbreich

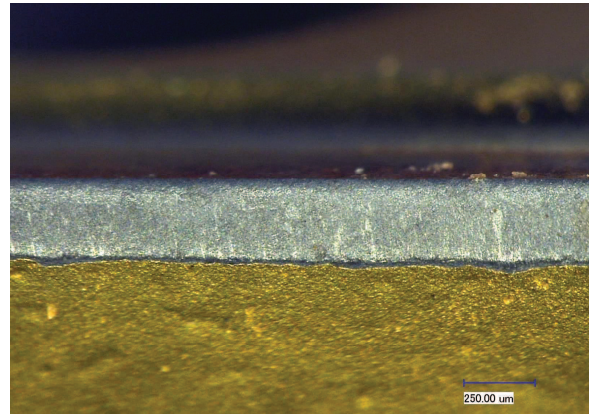


Abb. 5.30: Abrasiver Verschleiß entlang einer Schneidkante

Als weiteren Verschleißmechanismus konnte beim Bohren das Versagen durch grobe Brüche (gross fracturing) in Richtung der Bohrachse identifiziert werden. Dieser Mechanismus trat beim Bohren von Festgestein mit hohen Druckfestigkeiten auf. Abb. 5.31 und 5.31 zeigen die Ausbrüche beim Bohren von Granit. In diesem Fall konnte kein einheitlicher Spanvorgang erreicht werden, die Schneiden wurden durch die hohen Andruckkräfte punktuell belastet.

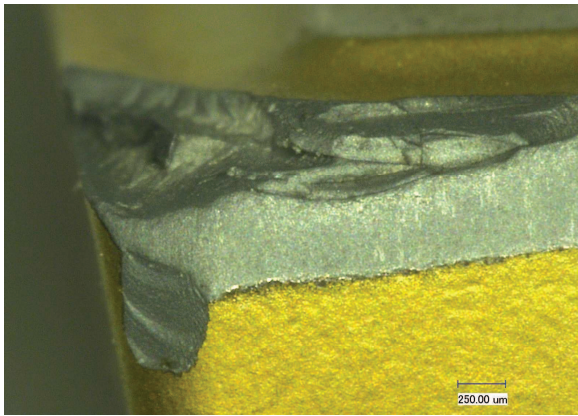


Abb. 5.31: Ausbrüche in Richtung der Bohrachse an einer Schneidplatte im Außenbereich

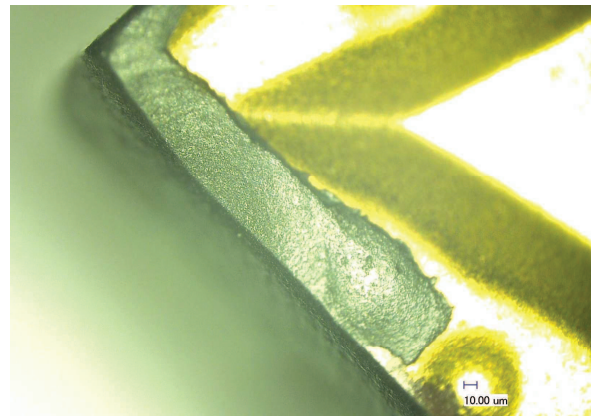


Abb. 5.32: Ausbrüche in Richtung der Bohrachse entlang einer Schneidkante

Begleitend zu den stark schwankenden Andruckkräften kam es ebenso zu plötzlichen Kraftanstiegen in Schnittrichtung. Grund hierfür kann im Verhaken der Schneiden an einzelnen herausstehenden Mineralkörnern gesehen werden. Dies führte zu unzulässig hohen, lokal auftretenden Spannungsspitzen, die Mikroabsplitterungen in Schnittrichtung (microchipping) zur Folge hatten. Ein Beispiel ist in Abb. 5.33 darstellt.

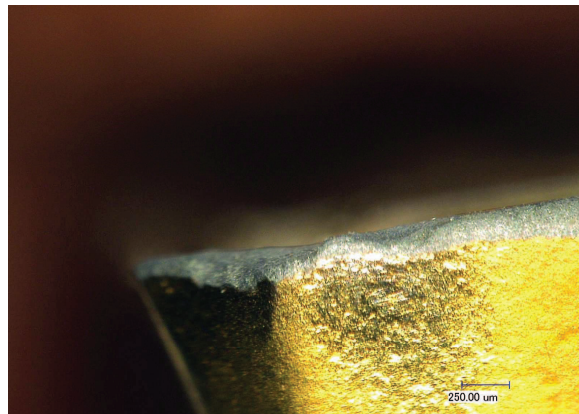


Abb. 5.33: Verschleiß infolge zu hoher Schnittkräfte im Außenbereich einer Schneidplatte

Anhand der untersuchten Gesteine mit einem konventionellen Schneidmaterial ist eine Aussage in Bezug auf die Bohrparameter hinsichtlich des Verschleißbildes möglich. Im Falle eines schleifenden Verschleißes kann von einem Spanvorgang bzw. von Reibvorgängen auf der Bohrlochsohle ausgegangen werden. Kommt es zu Ausbrüchen an den Schneidelementen in Schnitt- bzw. Vorschubrichtung, waren wahrscheinlich Kraftspitzen bzw. Schlageinwirkungen die Ursache. In diesem Fall kann der Andruck als zu gering zum Erreichen eines Spanvorganges, bzw. die Festigkeit des Schneidstoffes als ungenügend eingestuft werden. Die vorhandenen Untersuchungsergebnisse (z. B. Tab. 5.2) zum Verschleißbild stellen im Kontext mit den ermittelten quantitativen Aussagen aus den Bohrwerten und der energetischen Betrachtung der Bohrvorgänge eine umfassende Bewertungsbasis zu spangebenden Verfahren im Festgestein dar.

Tab. 5.2: Mittlere Verschleißwerte der Schneidplatten beim Bohren von unterschiedlichen Gesteinen

Gestein	mittlerer Verschleiß in g/m^3
Sandstein	11,12
Schiefer	1,97
Kalzitmarmor	0,27
Gneis	180,71
Granit	147,54

5.1.6 Bohrversuche mit neuen Schneidmaterialien

Betrachtungen zu den Schneidmaterialien

Die Entwicklung von neuen Schneidstoffen für geotechnische Anwendungen wird sehr stark von dem jeweiligen Einsatzzweck bestimmt. Die detaillierten Auswertungen der bereits erfolgten Bohrversuche zur spanenden Gesteinszerstörung wurden als Basis für die Erprobung neuer Materialien aus den Teilprojekten 6 und 8 des Freiburger Hochdruck Forschungszentrums verwendet. Bei diesen Materialien handelt es sich um Volumenhartstoffe welche durch Klemmmechanismen im Bohrkopf fixiert werden, Abb. 5.34 und 5.35.

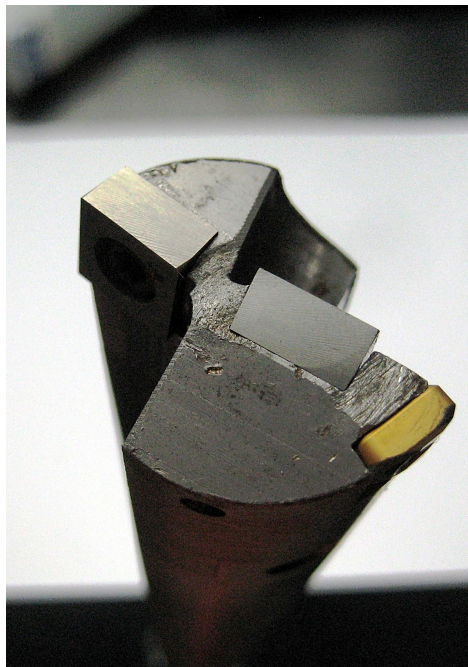


Abb. 5.34: Probenplattenfixierung mit Klemmschrauben



Abb. 5.35: Probenfixierung mittels Klemmpratzen

Im Laufe der Vorversuche wurde die Möglichkeit der Probenklemmung mittels Klemmschrauben untersucht. Nach Nutzung des angefertigten Wendeplattenbohrers stellten sich bei Testläufen mit neuen Materialien Nachteile bei der Befestigungsmethode heraus. Die durch Erodieren erzeugte Spannfläche in der Bohrung, einer sogenannten

Trompetenbohrung, wies aufgrund des Fertigungsverfahrens tiefe Einschnitte auf, die weit in das Material hinein reichten (max. $0,75\text{ mm}$). Die Aussparungen in der Oberfläche wirken als Kerben im Bauteil und setzen somit die Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Beanspruchungen stark herab. Durch den Bohrvorgang wurden die Spannungen im gefährdeten Querschnitt so groß, dass es zum Versagen kam und die verwendeten Platten auseinander brachen, Abb. 5.36 und 5.37. Um derartige Ausfälle zu vermeiden, wurde der Klemmmechanismus wie in Abb. 5.35 angepasst und die nachfolgenden Bohrungen mit den in Abschnitt 4.5.2 auf Seite 88 beschriebenen near-nano WC-Co Materialien ausgeführt.

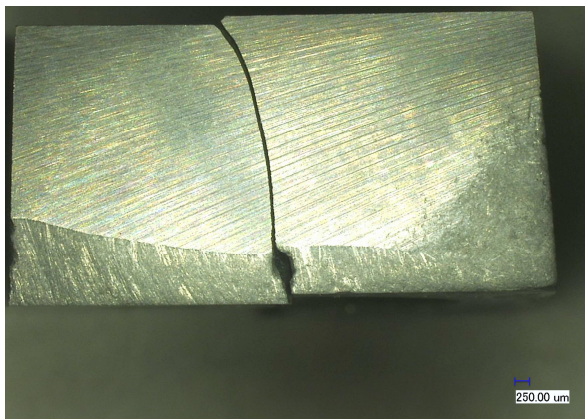


Abb. 5.36: Zerstörte Innenplatte

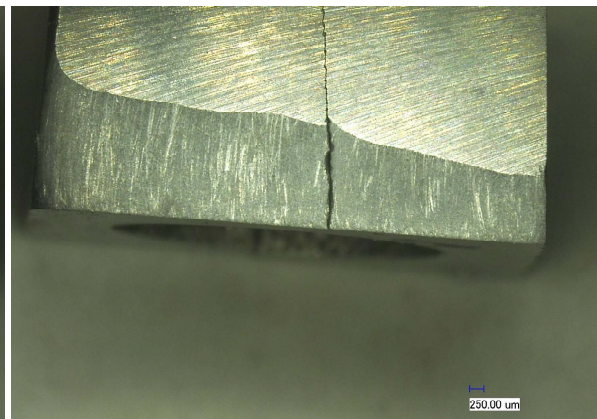


Abb. 5.37: Zerstörte Außenplatte

Bohrungscharakteristika und Verschleißverhalten

Die Einsatzgebiete für neue Werkstoffe sollten vor allem Bohrbereiche erschließen, die im geothermischen Anwendungsfeld liegen. Demnach wurde der erste Bohrversuch in einem kristallinen Festgestein, Freiburger Gneis, durchgeführt. Dieses Gestein wies, von den mit konventionellen Schneidmaterialien gebohrten, die dritthöchste einaxiale Druckfestigkeit neben Rhyolith und Lausitzer Granit auf. Der Gneis kann als abrasiv eingestuft werden. Wie in Abb. 5.38 zu erkennen, bilden sich hohe Kraftspitzen und Fluktuationen in der Bohrgeschwindigkeit aus. Die unterschiedlichen Bohrgeschwindigkeiten resultieren aus den Inhomogenitäten im Probegestein oder Veränderungen des Bohrwerkzeugs bzw. der Schneidgeometrien.

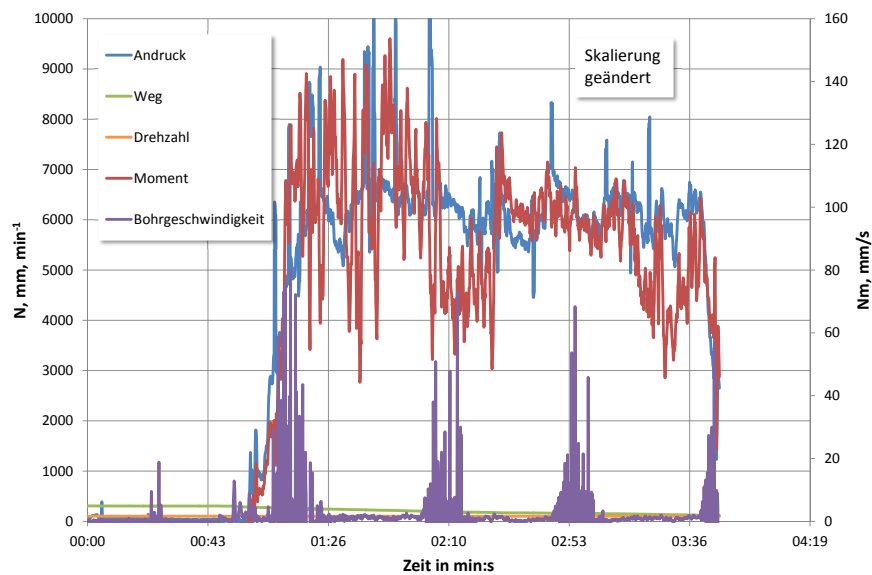


Abb. 5.38: Bohrverlaufdiagramm für Freiburger Gneis mit neuen Materialien

Nach abgeschlossenem Bohrvorgang wurden die Schneiden untersucht. Zur Ermittlung der Massenverluste wurden diese gewogen, um den Verschleiß zu quantifizieren. Am neue Probenmaterial wurde eine qualitative Einordnung der Verschleißerscheinungen vorgenommen. Hierbei wurden Ausbrüche an den Schneidecken der Innen- sowie Außenschneide verzeichnet, Abb. 5.39 und 5.40. Die nähere Untersuchung der Schneiden zeigten Anzeichen von schleifendem Verschleiß an der äußeren Schneidecke bis hin zum Überschreiten der ertragbaren Anpresskräfte (gross fracturing) im mittleren Bereich des Bohrkopfes.

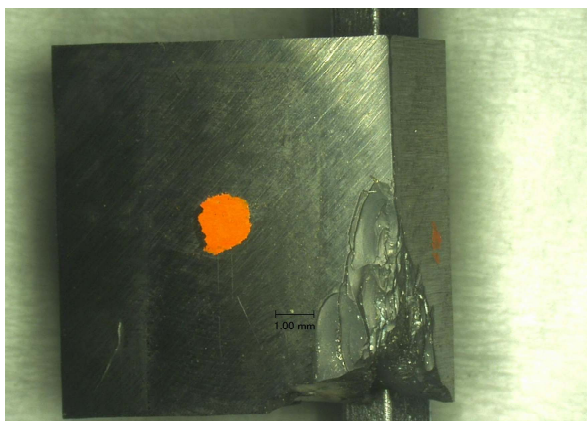


Abb. 5.39: Ausbrüche auf der Innenplatte aus neuem Material

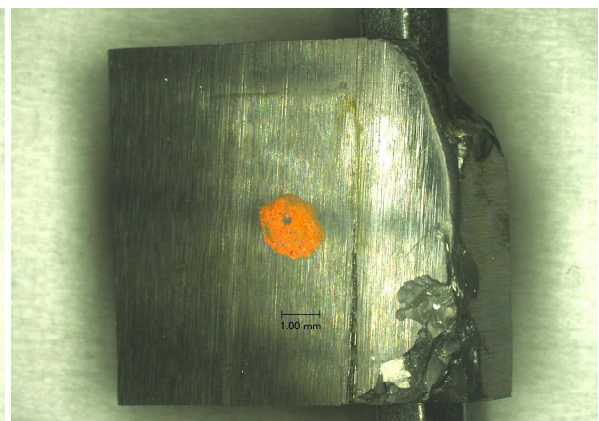


Abb. 5.40: Ausbrüche auf der Außenplatte aus neuem Material

Zur Überprüfung der Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven Verschleiß fanden die weiteren Bohrungen in Sandstein statt. Zu diesem Zweck wurde mit unterschiedlichen Auflasten und Drehzahlen gebohrt. Ein ermitteltes Bohrverlaufdiagramm ist in Abb. 5.41 zu sehen. Die Ausprägung der Andruckkraft und des Schnittmomentes lässt auf

einen ähnlichen Spanvorgang wie mit konventionellen Schneiden schließen.

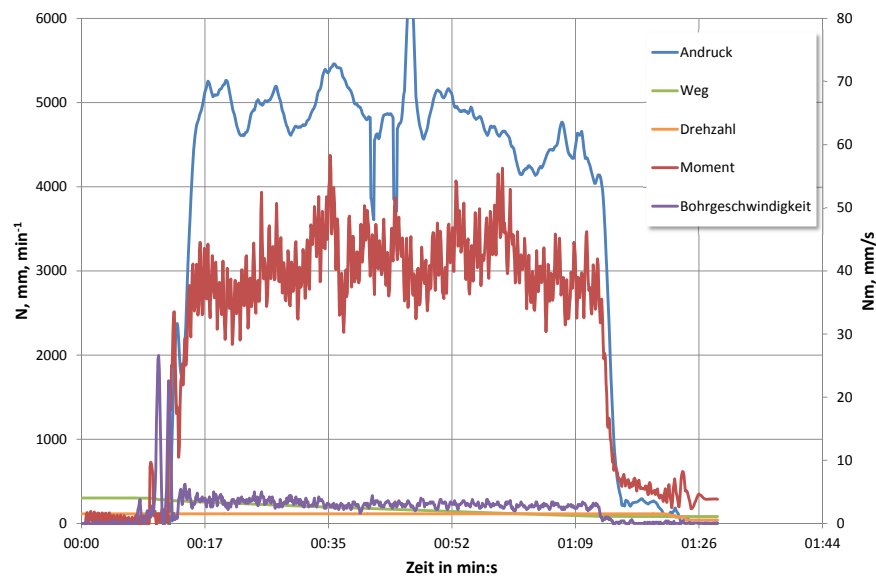


Abb. 5.41: Bohrverlaufdiagramm für Postaer Sandstein mit neuen Materialien

Aus den Mikroskopaufnahmen, Abb. 5.42 und 5.43, sind nur geringe Verschleißerscheinungen zu erkennen. Qualitativ handelt es sich um abrasiven Materialabtrag in den Bereichen der Schneiden mit den höchsten Relativgeschwindigkeiten.

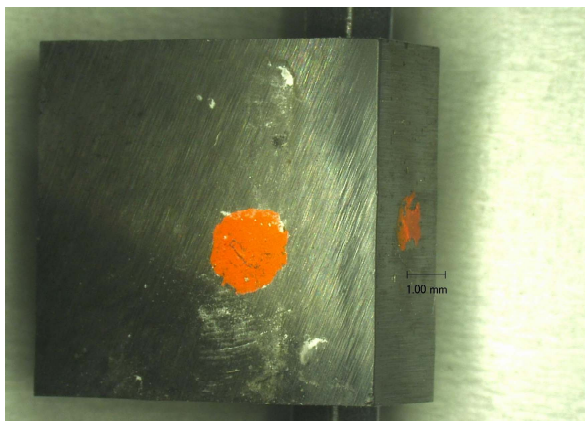


Abb. 5.42: Abrasiver Verschleiß der Innenplatte aus neuem Material

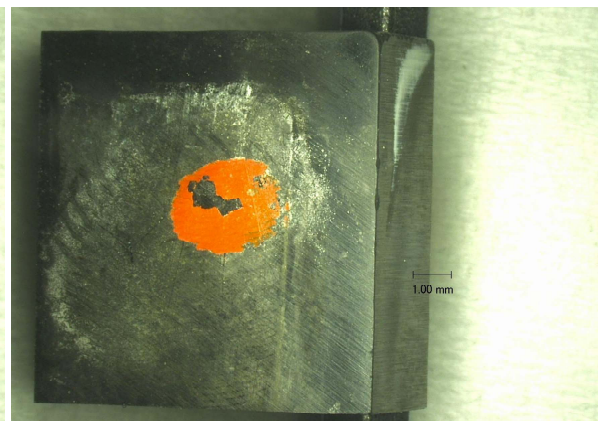


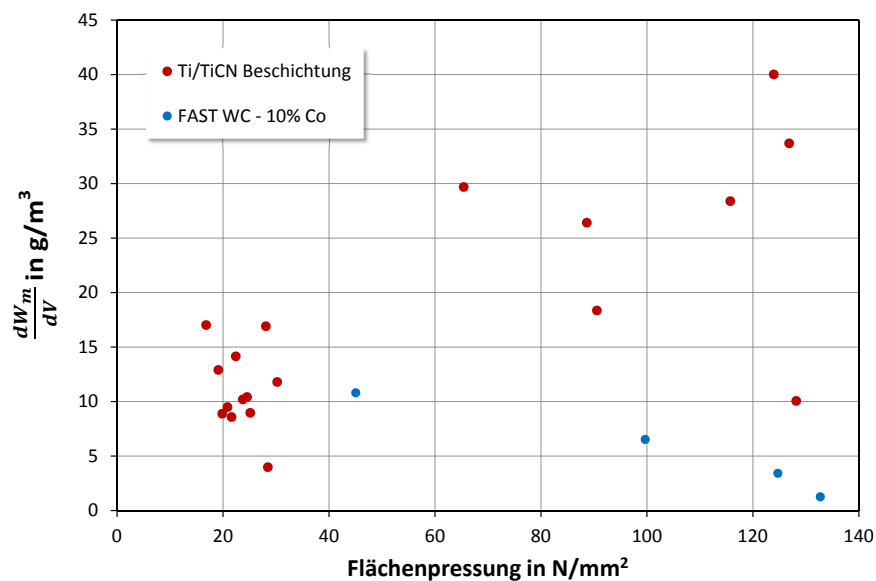
Abb. 5.43: Abrasiver Verschleiß der Außenplatte aus neuem Material

Die Verschleißwerte für die einzelnen Platten lagen bei den Bohrversuchen meist unter den Werten der konventionellen Schneidmaterialien, die unter gleichen Bedingungen (Andruck und Drehzahl) erprobt wurden. Als vergleichbarer Parameter wurden hierbei die sich einstellende Flächenpressungen unter der Schneide betrachtet. In Tab. 5.3 sind exemplarisch die ermittelten Massenverluste bezogen auf ein gebohrtes Volumen von einem Kubikmeter Gestein eingetragen.

Tab. 5.3: Verschleißwerte der Schneidplatten beim Bohren von Sandstein bei gleichen eingestellten Andruckwerten

Werkstoff	Flächenpressung in N/mm^2	Verschleiß in g/m^3	spez. Energie in N/mm^2
Ti/TiCN Schicht	70,19	12,90	90,24
	80,39	14,14	111,00
	110,68	11,80	137,75
near-nano WC-Co	89,07	3,42	202,14
	49,86	10,81	207,10
	94,80	1,26	178,14
	71,20	6,53	175,35

Aus den ermittelten Werten lässt sich eine Tendenz zu geringen Verschleißraten (Verschleiß - Durchsatzverhältnis) bei abrasiven Sedimentgesteinen ableiten. Abb. 5.44 zeigt die Verschleißwerte von konventionellen Materialien und den beprobten neuen Schneidstoffen. Es ist festzustellen, dass die neuen near-nano WC-Co Werkstoffe tendenziell eine geringere Verschleißrate als die konventionell eingesetzten Materialien aufweisen.

**Abb. 5.44:** Verschleißversuche mit neuen Materialien

Die Versuche zeigten ein mögliches Einsatzfeld für diese Materialien in Bezug auf Gesteinsfestigkeit und Verhalten beim Bohren für Sedimentgesteine auf. Die gesamten Bohrverlaufsdiagramme mit dem neuen Material sind im Anhang B auf Seite 180 an diese Arbeit angefügt. Die Nutzung im Einsatzfeld von hartem kristallinen Festgestein (Gneis, Granit) konnten in Bezug auf die eintretenden Kraftspitzen und Schlagereignisse, vgl. Abb. 5.40 und 5.39, nicht bestätigt werden.

5.2 Schlagende Gesteinszerstörung

5.2.1 Kräfte und Auftreffgeschwindigkeiten

Ausgangspunkt für die Analyse des Schlagvorganges war die Darstellung der aufgezeichneten Kraft am Meißel und der Eindringtiefe des Meißels in das Gestein (Abb. 5.45). In dem Diagramm sind sechs exemplarisch ausgewählte Messreihen mit jeweils unterschiedlicher Fallhöhe abgebildet.

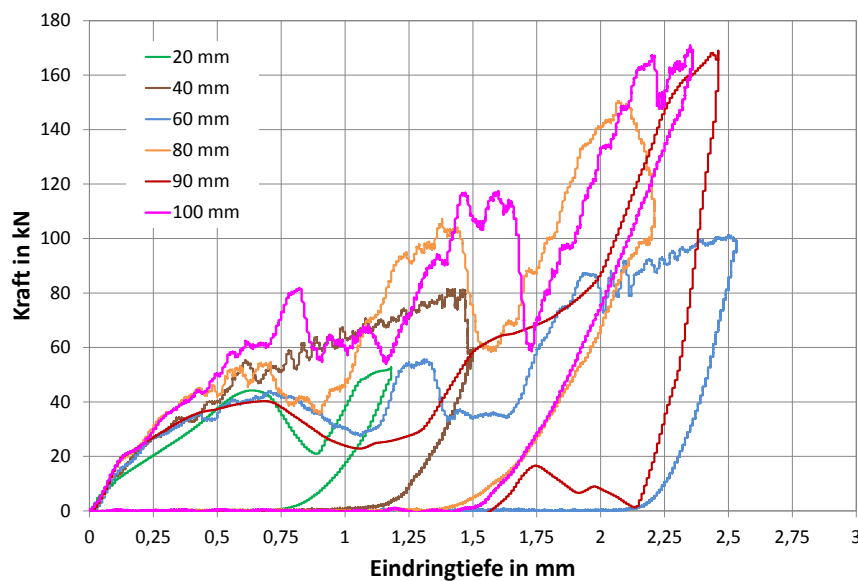


Abb. 5.45: Kraft am Meißel in Abhängigkeit der Eindringtiefe in das Gestein für Fallhöhen zwischen 20 und 100 mm

Zu erkennen ist, dass sich die Kraftanstiege im ersten Bereich bis ca. 0,6 mm Eindringtiefe in allen Versuchsreihen nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Daraus lässt sich eine proportionale Abhängigkeit von Kraft und Eindringtiefe ableiten. Dies ist aber nur begrenzt gültig, da das Gestein einen inhomogenen Aufbau hat, welcher sich auf das Eindringverhalten des Meißels in das Gestein auswirkt. Die Inhomogenität wirkt sich mit steigender Eindringtiefe stärker auf den Schlagvorgang aus. Wie im Graphen der 20 mm Fallhöhe (grün) zu erkennen ist, kommt es nach ca. 0,6 mm Eindringtiefe zu einem Krafteinbruch. Durch den Meißel wird in dem Gestein eine Spannung aufgebaut. Auf Grund der Inhomogenität in der Zusammensetzung des Quarzporphyr oder die bereits vorhandenen Risse in dem Probekörper kam es dazu, dass größere Stücke des Gesteins ausbrachen, wodurch die Kraft kurz abfiel und der Meißel schneller und weiter in das Gestein eindrang. Wie sich bei dem Versuch mit 60 mm (blau) Fallhöhe zeigte, konnte so bei einer kleineren Kraft ein höherer Eindringweg erreicht werden. In dem Versuch mit 40 mm Fallhöhe (braun) kann ein solcher Krafteinbruch nicht festgestellt werden. Dadurch kann das Gestein an dieser Stelle als annähernd homogen und frei von Störstellen betrachtet werden.

Trifft der Meißel auf die Gesteinsoberfläche, so dringt dieser nicht direkt ein, sondern es bildet sich zunächst eine Druckspannung im Gestein unterhalb der Kontaktfläche zwischen Gestein und Meißel. Überwindet die Druckspannung die Druckfestigkeit des Gesteins, so dringt der Meißel in das Gestein ein. Nach Untersuchungen von RINEHARTH [81] kann die dynamische Druckfestigkeit um 5 bis 10 mal höher als die im Labor gemessene statische Druckfestigkeit sein. Daraus lässt sich ein Wertebereich für Rhyolith für die dynamische Druckfestigkeit von 1184 bis 2368 N/mm^2 ermitteln. Demzufolge muss die Druckspannung bei Auftreffen des Meißels diesen Mindestwert überschreiten.

Die Druckspannung im Gestein ist gleich der Spannung, die an der Meißeloberfläche auftritt. Diese Oberflächenspannung σ_A errechnet sich aus der auf den Meißel wirkenden Kraft F und der von der Eindringtiefe abhängigen Oberfläche des Meißels ($A_M = f(s)$), Gleichung (5.1). Dabei wird angenommen, dass der Meißel immer in vollständigem Kontakt mit der Gesteinsoberfläche steht.

$$\sigma_A = \frac{F}{A_M} \quad (5.1)$$

In Abb. 5.46 ist zu erkennen, dass in allen Versuchen zunächst eine Spannungsspitze im Bereich von 2200 bis 2700 N/mm^2 auftritt. Dies bestätigt die These, dass zunächst ein um ein Vielfaches höherer Wert der Druckfestigkeit überwunden werden muss. Unter der Annahme, dass der dynamische Faktor 10 beträgt, würde sich für die Gesteinsproben eine Druckfestigkeit von 220 bis 270 N/mm^2 ergeben, was mit den Untersuchungsergebnissen für die Eigenschaften der Gesteinsproben übereinstimmt.

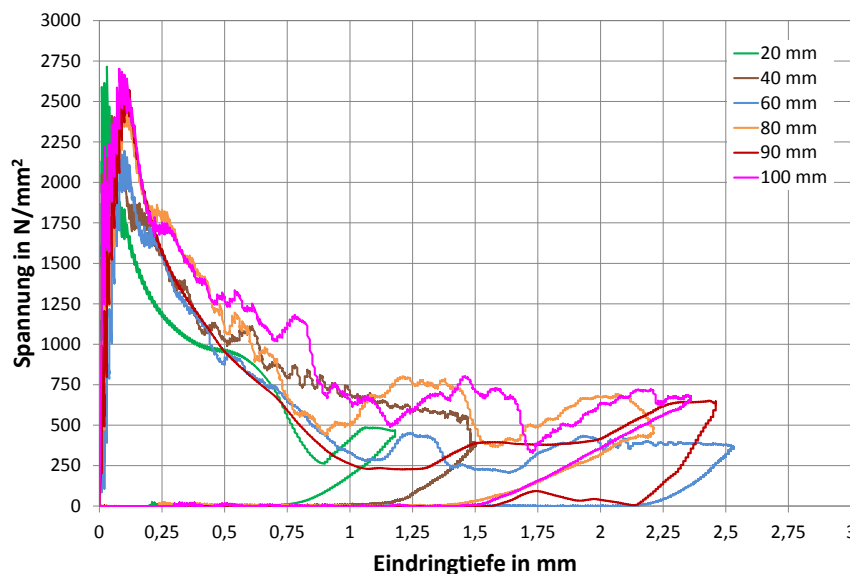


Abb. 5.46: Spannungen unter dem Meißel in Abhängigkeit der Eindringtiefe in das Gestein für Fallhöhen zwischen 20 und 100 mm

Nach ca. 1 mm Eindringtiefe stellt sich eine annähernd konstante Spannung an der Kontaktfläche zwischen Meißel und Gestein im Bereich der ein- bis dreifachen Druckfestigkeit ein. Das heißt, dass der Wert der Oberflächenspannung stets über diesem Bereich liegen muss, damit der Meißel weiter in das Gestein eindringen kann. Sinkt die Spannung unter diesen Wert, so ist kein weiteres Vordringen möglich. Zu einem Spannungs- und Kraftabfall kommt es, sobald der Meißel vollständig vom Gestein abgebremst und die Meißelgeschwindigkeit null geworden ist. Ein Teil der Schlagenergie wird in den Meißel reflektiert, wodurch dieser anschließend nach oben beschleunigt wird (Abb. 5.47).

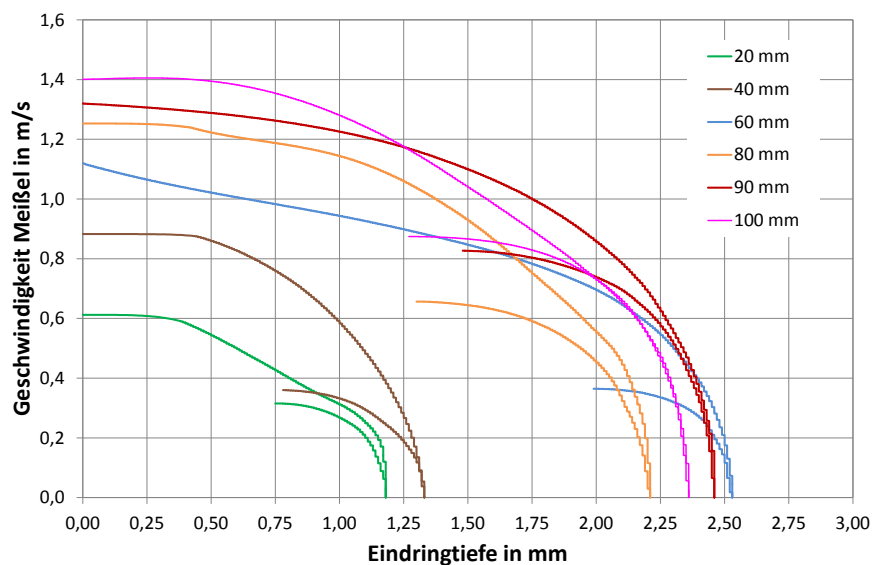


Abb. 5.47: Geschwindigkeit des Meißels in Abhängigkeit der Eindringtiefe in das Gestein für Fallhöhen zwischen 20 und 100 mm

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Meißel im Versuch mit 60 mm Fallhöhe eine deutlich geringere Abbremsung erfährt als beispielsweise der Versuch mit 80 mm Fallhöhe. Wie sich bereits aus Abb. 5.45 ergab, lässt sich auch hier ableiten, dass der Meißel beim Eindringen in das Gestein einen geringeren Widerstand erfährt und trotz der anfänglich geringeren Schlagenergie eine höhere Eindringtiefe erreicht. Im Versuch mit 40 mm Fallhöhe erfährt der Meißel eine viel stärkere Abbremsung, wodurch eine geringere Eindringtiefe erreicht wird.

Der Vergleich verschiedener Auftreffgeschwindigkeiten war durch die Versuchsanlage stark begrenzt. Dies ist zum einem der hohen Fallmasse und zum anderen den Abmaßen der Proben geschuldet. Grundsätzlich konnten Geschwindigkeiten bis 1,4 m/s untersucht werden. Als subjektiver Eindruck der Versuche lag bereits bei diesen Geschwindigkeiten ein Schlagereignis vor.

5.2.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Zur besseren Ermittlung der Mechanismen der schlagenden Gesteinszerstörung wurden Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera angefertigt. Mit Hilfe der ausgewerteten Bilder ist eine detaillierte Erfassung der Schlagvorgänge unter atmosphärischen Bedingungen möglich. Abb. 5.48 zeigt ein Beispiel für die Auswertung der Kamerabil-

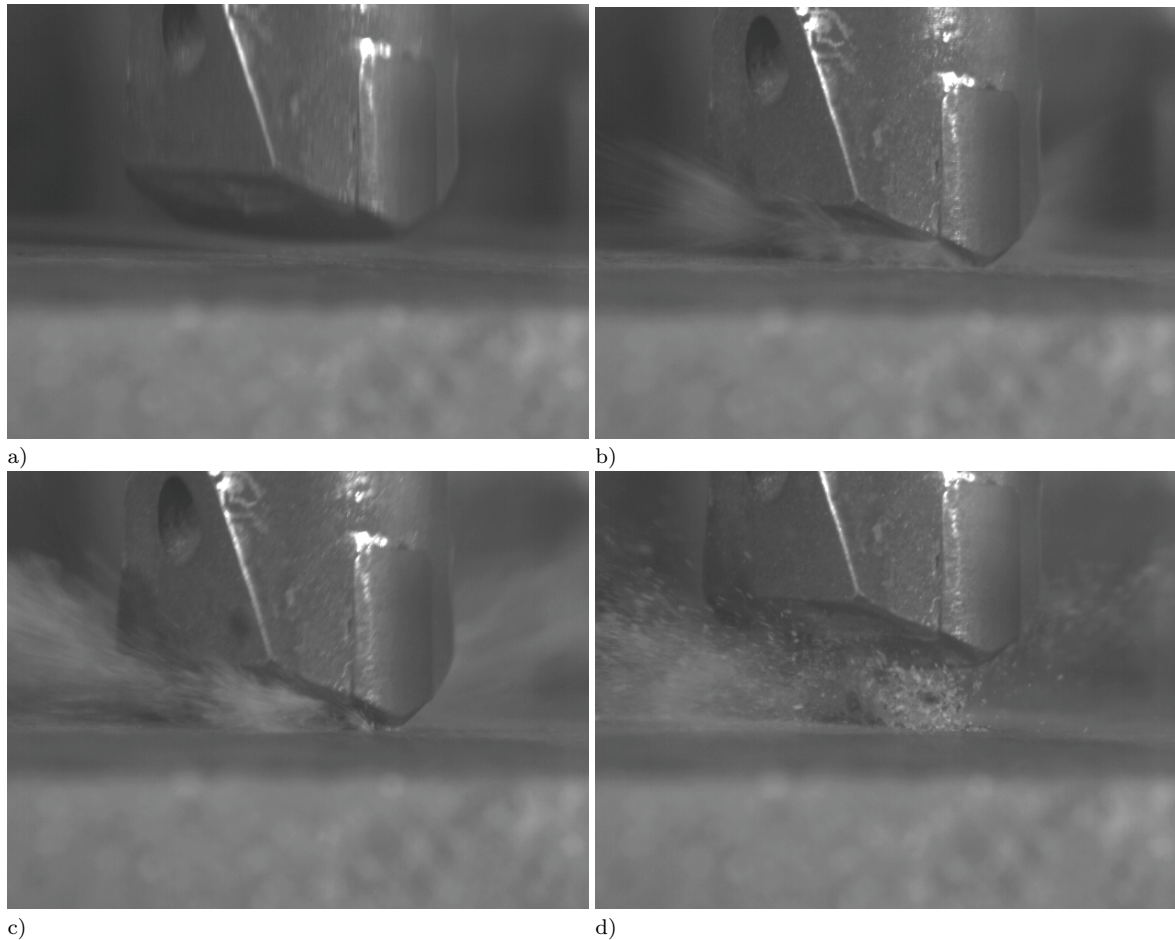


Abb. 5.48: (Aufnahmen vom Aufschlagen und Zurückfedern der Meißelspitze mittels Hochgeschwindigkeitskamera für Rhyolith, Fallhöhe 60 mm, Fallgewicht 194 kg)

Die Abb. 5.48 a) zeigt den Meißel in der Abwärtsbewegung kurz vor dem ersten Kontakt mit dem Gesteinswürfel. Folgend ist der Meißel ein Stück in das Gestein eingedrungen, b). Es ist zu erkennen, dass das herausgebrochene Gesteinsmaterial zu den Seiten hin weggeschleudert wird. Im weiteren Verlauf dringt der Meißel weiter ein, wobei Material ausbricht. In Abb. 5.48 c) ist der Meißel maximal eingedrungen und befindet sich im Teilbild d) wieder in der Aufwärtsbewegung. Anhand dieser ersten Ausgangsversuche wurden weitere Versuchsreihen mit Rhyolith, Quarzit und Gabbro und einem konischen Meißelinsert vorgenommen, Abb. 5.49

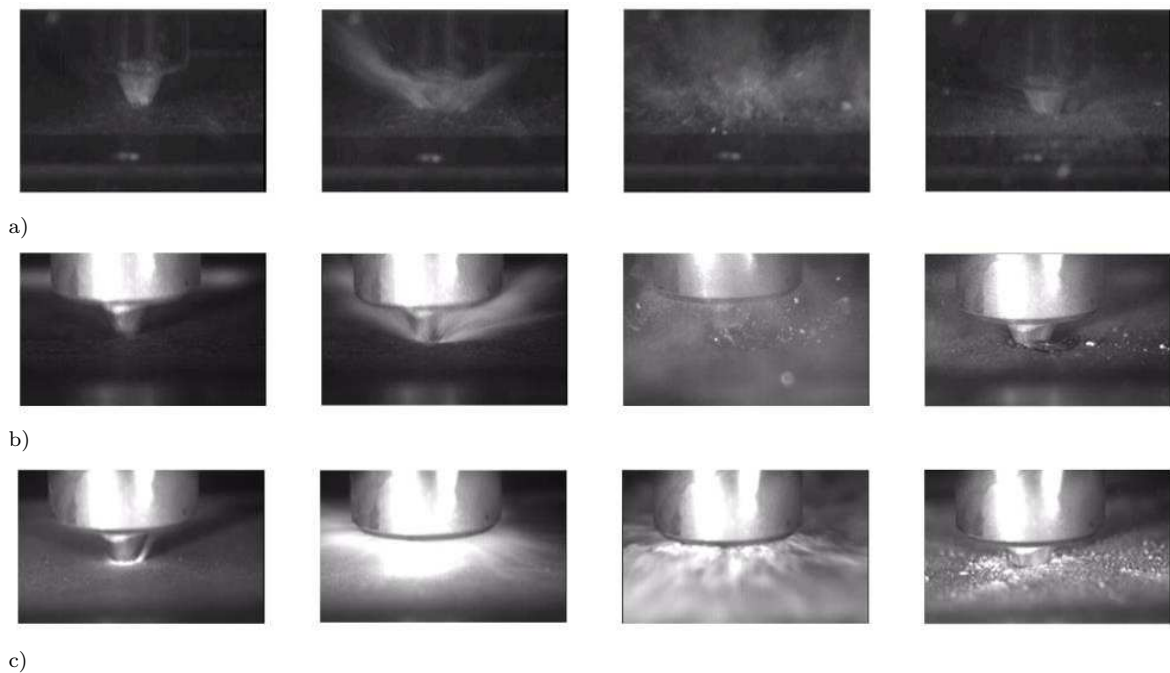


Abb. 5.49: (Aufnahmen der Fallwerksversuche mit einem Meißelinsert für a) Rhyolith, b) Gabbro, c) Quarzit nach LEHMANN [55]

Wie für den Meißel mit Längsschneide ist aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen erkennbar, dass das Eindringverhalten des Meißelinserts bei allen drei Gesteinen unterschiedlich ist. Im Falle der gröberen Struktur des Rhyolith und Gabbro im Vergleich zum Quarzit, kommt es beim Lösen zu größeren Gesteinsstücken. Dies ist vor allem mit dem Bruchverlauf entlang der Korngrenzen zu erklären und konnte mit Hilfe einer Korngrößenanalyse der gelösten Gesteinspartikel bewiesen werden [55].

5.2.3 Eindringenergien

In der Praxis stellt die Einzelschlagenergie von Bohrhämmern einen wichtigen Auslegungsparameter dar. Mit der Erzeugung einer größeren Schlagenergie geht ein erheblicher technologischer Aufwand einher, da die Entwicklungs- und Produktionskosten enorm ansteigen.

Ein weiterer Punkt betrifft das Verhältnis von aufgebrachter Energie zu der tatsächlich erreichten Eindringtiefe. Wie sich aus Abb. 5.50 entnehmen lässt, nimmt die aufzubringende Schlagenergie mit der erreichten Eindringtiefe exponentiell zu. Eine Aussage darüber, bis zu welcher Erhöhung der Schlagenergie noch eine wesentliche Steigerung der Eindringtiefe möglich ist, lässt sich anhand der Versuche ebenfalls abschätzen.

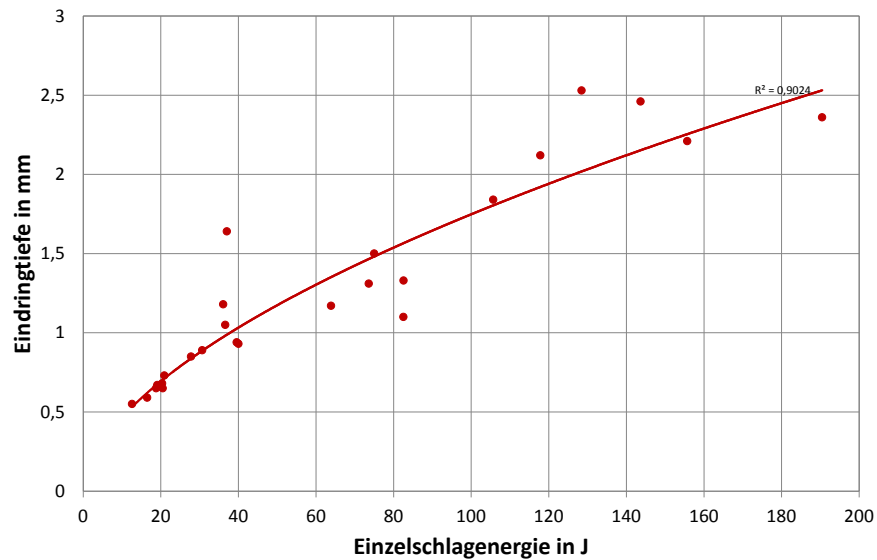


Abb. 5.50: Einzel Schlagenergie am Versuchsaufbau für einen Flachmeißel in Abhängigkeit der Eindringtiefe in Rhyolith

Für eine solche Versuchsreihe lassen sich eine empfohlene maximal anzuwendende und minimal aufzubringende Schlagenergie ableiten. Letztere ist nötig, um überhaupt die Druckfestigkeit des Gesteins überwinden zu können und einzudringen. Wird die maximal empfohlene Energie überschritten, so erfolgt keine signifikante Steigerung der Eindringtiefe und der Vorgang wird ineffektiv.

Zur Einschätzung der Effektivität eines Schlagvorganges kann nach Gleichung (3.11) der Schlagwirkungsgrad λ_S bestimmt werden. Hierfür wurde bei dem Versuch mit 10 mm Fallhöhe das Fallgewicht nach dem ersten Schlag nicht abgebremst. Es konnte selbstständig bis zum vollständigen Stillstand ausschlagen, Abb. 5.51.

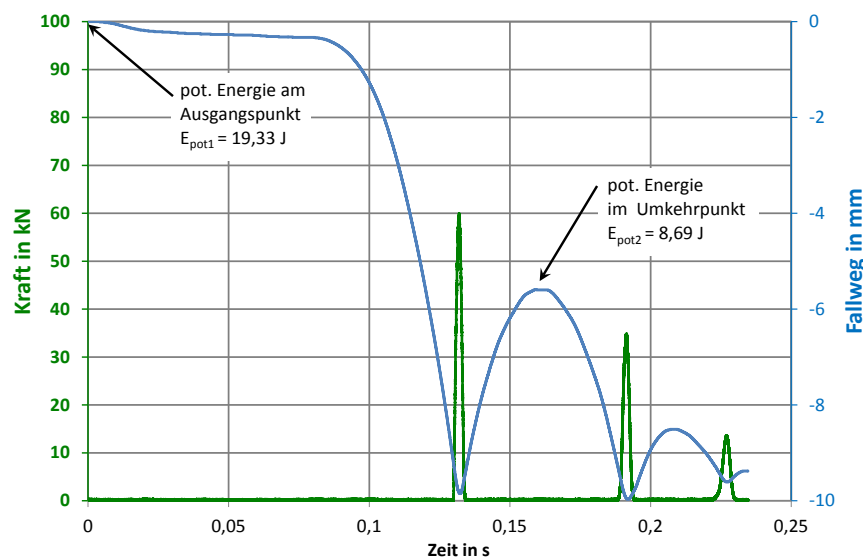


Abb. 5.51: Kraft- und Wegverlauf für einen Versuch mit 10 mm Fallhöhe, einem Meißel mit Längsschneide und Rhyolith als Gestein

Das Fallgewicht wurde aus einer Höhe von 10 mm im freien Fall nach unten beschleunigt. Beim Auftreffen des Meißels auf das Gestein wurde eine maximale Kraft von 60 kN gemessen. Auf Grund der Reflexion der Energie in den Meißel wurde das Fallgewicht wieder nach oben beschleunigt, bis die komplette kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt war. Das Fallgewicht kam erneut zum Stillstand und wurde anschließend wieder nach unten beschleunigt. Unter Vernachlässigung der Verluste durch Reibung berechnet sich die Differenz aus den beiden potentiellen Energien, der am Ausgangspunkt E_{pot1} und der am Umkehrpunkt E_{pot2} , die tatsächlich in das Gestein übertragene Energie $E_{S,dissipiert}$ zu $10,64\text{ J}$. Ausgehend von der Annahme, dass die potenziell zur Verfügung gestellte Energie komplett in kinetische umgewandelt wurde, ergibt sich ein Schlagwirkungsgrad λ_S von 55% . Die weiteren Versuchsreihen mit Rhyolith, Quarzit und Gabbro und einem konischen Meißelinsert verfolgten ebenfalls diesen Ansatz. Hierbei zeigten sich Schlagwirkungsgrade in der Größenordnung von $70\text{--}90\%$. Als Grund für die Abweichungen zu den ersten Versuchen konnte eine minimale Schlagenergie identifiziert werden. Unterhalb dieser wurde das Gestein hauptsächlich durch Zerdrücken zerstört. Begründet kann dies mit dem Anteil an Sprödbuch in der Kraterzone werden, welche ab der minimalen Schlagenergie progressiv ansteigt.

Die Beobachtungen bestätigten den Verlauf der Kraftanstiege, welche beim Quarzit gleichmäßiger als bei den beiden anderen Gesteinen ausgeprägt waren. Ein ähnliches Bild zeichnet sich beim Vergleich der Eindringtiefe in Abhängigkeit zur aufgebrachten Einzelschlagenergie ab, Abb. 5.52. Im Falle des Quarzits werden mit den aufgebrachten Schlagenergien geringere Eindringtiefen im Vergleich zu den beiden anderen Proben gestein erreicht. Als Grund hierfür ist wiederum die Energiedissipation durch die Zerkleinerung des Gesteins zu sehen.

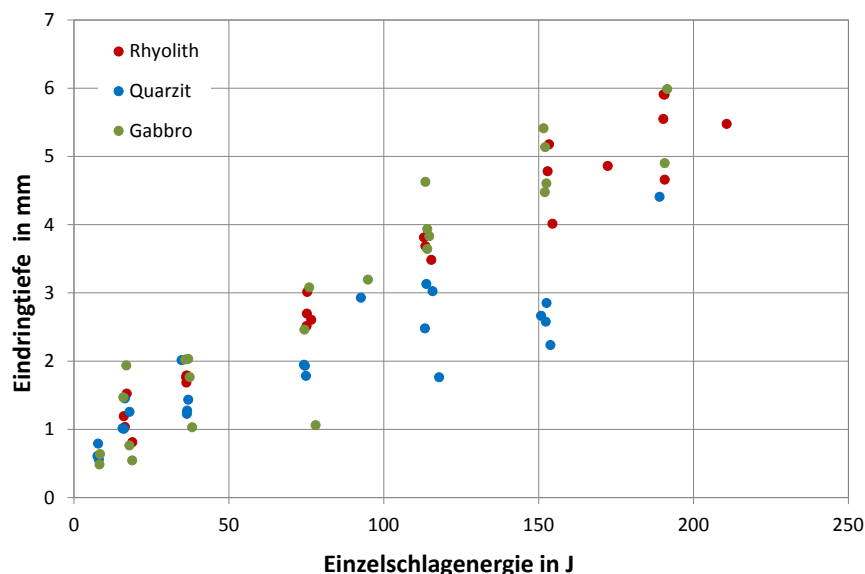


Abb. 5.52: Erreichte Eindringtiefe in Abhängigkeit der Einzelschlagenergie

Weiterführende Untersuchungen bezogen sich auf die geschaffenen Kratervolumina. Hervorzuheben sind bei ähnlichen Tendenzen die hohe Zahl der großen Krater beim Rhyolith, die als Ursache die grobe Textur im Gefügebau hat. Gut zu erkennen sind die großen Wirkradien der Schlagversuche beim Rhyolith. Im Gegensatz zum Gabbro und dem Quarzit sind die eingedrungen Schneidengeometrien oftmals nicht mehr klar zu erkennen, was auf sehr große gelöste Gesteinsteile hindeutet. Beim Quarzit hingegen lässt sich die runde Form des Meißels sehr gut erkennen. Diese befindet sich annähernd im Zentrum des Kraters. Dies deutet auf eine gleichmäßige Spannungsverteilung um den Meißel hin. Beim Rhyolith und Quarzit ergibt sich teilweise eine sehr ungleichmäßige Verteilung um den Meißel. Dies lässt sich wieder auf die Struktur und eine ungleichmäßige Bruchbildung der Gesteine zurückführen. Im Zuge der Erhöhung der Einzelschlagenergien kam es zu einer wachsenden Streuung der Ergebnisse, was den starken Einfluss der mineralogischen Komponenten in Bezug auf Zusammensetzung, Textur und Korngröße deutlich macht.

Die Betrachtung der spezifischen Energie für schlagende Verfahren stellt, wie bei dem spanenden Pendant, ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Nach BELOHLAVEK und LUY [14, 58] bewegen sich die spezifischen Energien für Schlagbohrverfahren zwischen 300 und 800 N/mm^2 . Da es sich um Eindringversuche einzelner Inserts handelte, verwiesen die Versuche auf niedrigere Werte (Abb. 5.53). Als Gründe sind die nicht berücksichtigten Reibungsverluste und Verschleißprozesse, welche in der Praxis auftreten, zu sehen. Aus den Untersuchungen geht eine Abnahme der spezifischen Energie bei Verwendung von höheren Einzelschlagenergien hervor. Somit steigt der Wirkungsgrad des Verfahrens mit der Energieerhöhung des Schlagimpulses.

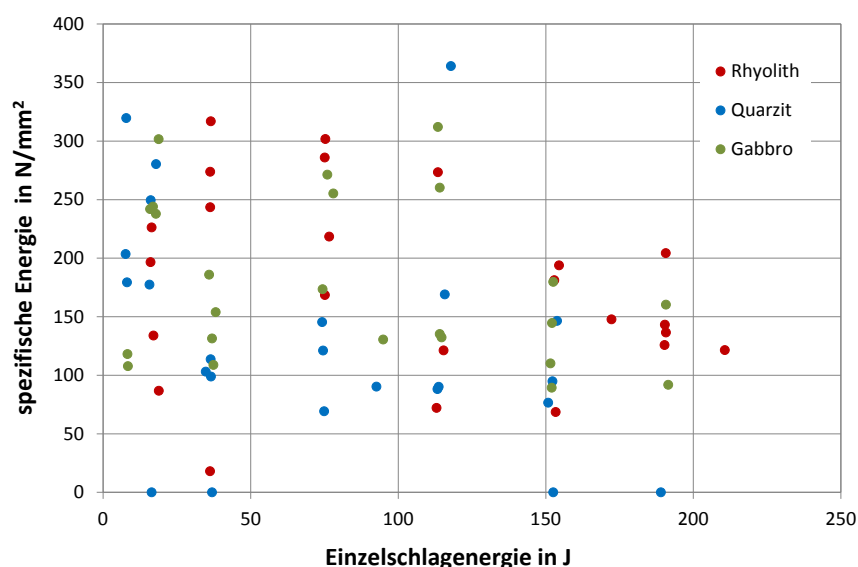


Abb. 5.53: Spezifische Energie in Abhängigkeit der aufgetragenen Einzelschlagenergie

Aus den vorangegangenen Untersuchungen mit einem Flachmeißel konnte eine Ge-

brauchsbeziehung aufgestellt werden, Gleichung (5.2). Mit dieser ist es möglich, die zu erreichende Eindringtiefe für einen Meißel abzuschätzen. Die Anwendung beschränkt sich auf den linearen Teil der Kurve im Graph einer Eindringtiefe - Einzelschlagenergie Funktion, vergl. Abb. 5.50 und 5.52

$$s = \frac{E_{S,kin} \cdot \lambda_s}{A_M \cdot \sigma_D \cdot 1000} \quad (5.2)$$

Dabei gilt:

s	Eindringtiefe des Meißels in das Gestein in m
$E_{S,kin}$	kinetische Schlagenergie in J
λ_s	Schlagwirkungsgrad
A_M	Meißelfläche in m^2
σ_D	einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins in N/m^2

Ziel der Untersuchung der schlagenden Gesteinszerstörung war es, eine Abschätzung der Kräfte bei einer schlagartigen Beanspruchung durch ein Werkzeug zu treffen. Nach Analyse der zu überwindenden dynamischen Festigkeiten konnten wichtige Aussagen zu Schlagwirkungsgraden und Energieeinträgen ermittelt werden. Die Bestimmung von spezifischen Energien bei diesem Bohrverfahren ermöglicht weitergehende Untersuchungen in Bezug auf die Löseffizienz von Hartgestein.

6 Werkstoffparameter

6.1 Grundlegendes Ziel der Untersuchungen

Die Anwendung neu entwickelter Hartstoffe im geotechnischen Bereich stellt die Entwickler vor die Frage, welche Belastungen neue Materialien zu ertragen haben und wie sich die Umgebungsbedingungen am Einsatzort gestalten. Der Kontakt mit Gestein erfordert vielfältige Anpassungen mit oftmals sehr speziellen Belastungsarten. Diese reichen von abrasiver bzw. erosiver Natur, bis hin zu Druck- und Schlagbeanspruchungen. Weiterhin können bei kombinierten Belastungen auch thermale Effekte zum Tragen kommen.

Als Ausgangskriterien sind die gesteinsmechanischen Eigenschaften des zu zerstörenden Gesteins heranzuziehen. Druckfestigkeiten, Verformungsverhalten, Härte und Abrasivität geben wichtige Hinweise zur ersten Einschätzung der Belastungen, die im Kontakt mit dem Gestein entstehen und können auf ein zu erwartendes Verschleißbild hinweisen. Weiterhin sollten die Parameter beim Einsatz der Materialien auch einem Abgleich mit Erfahrungswerten unterzogen werden, um vielversprechende Ansätze weiter zu verfolgen.

Durch Bohr- und Fallwerksversuche sind die grundlegenden Fragen zu Kraftverläufen, Pressungen an den Schneiden sowie Belastungs- und Bohrgeschwindigkeiten zu beantworten. Hieraus ist es möglich Modelle zu entwickeln und diese auf andere Schneidgeometrien zu übertragen. Weiterhin ist es möglich die Effektivität der Bohrverfahren im jeweiligen Gestein zu bewerten und Grenzen in Bezug auf Druckfestigkeit und dem Verschleißpotential im Gestein aufzuzeigen. Die Möglichkeit von Aufnahmen mit Hochgeschwindigkeitskameras geben einen visuellen Eindruck der eigentlichen Mechanismen und tragen zum Verstehen der Vorgänge bei. Durch Ermittlung von Kennlinien besteht ein praktischer Nutzen zur Dimensionierung von Bohrwerkzeugen und der Formulierung von Einsatzbereichen für neue Materialien.

6.2 Anforderungen an Werkstoffe für Anwendungen in der Bohrtechnik

6.2.1 Anforderungen aus der Literatur

Die Auswahl des jeweiligen Werkstoffes für einen Einsatz in der Gesteinsbohrtechnik ist stark abhängig vom Anwendungsfeld. Zum einen besteht die Notwendigkeit, Gestein zu lösen bzw. zu trennen. Hierbei spielen vor allem die speziell durch das Gestein vorgegebenen Zerstörungsmechanismen die tragende Rolle. Um sehr harte Gesteine zu bearbeiten, müssen die hohen Schwellendrucke beim Eindringen überwunden werden und dies wirkt sich auf die Geometrie der Werkzeuge aus. Je härter das Gestein, desto kleiner werden in der Praxis die Span- und umso größer die Keilwinkel an den Schneiden gestaltet. Dies steht im Gegensatz zum allgemeinen Bild des Spanvorgangs im Maschinenbau. Ein Grund hierfür ist in den unvermeidlich auftretenden Schlagbelastungen, welche auf die Werkstoffe wirken, zu sehen. Dies hat zur Folge, dass die Schneiden eher stumpfer ausgeführt werden und die Aufnahmen der Inserts ebenfalls einem Trend zur verstärkten Ausführung unterliegen. Die Weitergabe und Einleitung von auftretenden Stoßbelastungen in den Bohrkopf führt zu einer notwendigen stärkeren Dimensionierung der Stützkonstruktion.

Da für Einsätze in der Tiefbohrtechnik die Aufwendungen für eine Werkzeuginspektion sehr hoch sind (Aus- und Einbau des Gestänges), wird meist auf hohe Sicherheiten zurückgegriffen, um die Ausfallwahrscheinlichkeit zu minimieren. Für eine erste Einschätzung der aufzuwendenden Andruckkräfte bei Bohrwerkzeugen kann die Einteilung nach PROTODJAKONOV verwendet werden. Hieraus ist die Berechnung der Spannungen, welche auf die Schneidmaterialien wirken, approximierbar. Eine Abschätzung der zu erreichenden Bohrmeter kann z. B. nach SIEVERS erfolgen.

Als weitere Anwendung werden harte Materialien zum Verschleißschutz an z. B. Bohrgestängen eingesetzt. Hierbei sind sehr hohe Belastungen durch Erosion und Abrasion sowie thermale Wechselbeanspruchungen maßgebend. Wichtige Auswahlkriterien sind aus dem CERCHAR Verschleißmarken und dem Verschleißkoeffizienten nach SCHIMAZEK zu ziehen. Weiterhin sind oftmals umfangreiche Daten von ähnlichen Bohrungen, wie sie in der Erdöl- und Petroleumindustrie vorkommen, als Basis für die Planung von Werkzeugeinsätzen hilfreich. Die Auswahl von Schneidstoffen für diese hochspezialisierten Anwendungen wird meist unter Beachtung der entstehenden Gesamtkosten getroffen. Die Minimierung der Ausfallwahrscheinlichkeit geht somit einher mit der Nutzung von sehr kostenintensiven Materialien.

6.2.2 Anforderungen aus drehenden Bohrversuchen und Schlagbeanspruchung

Das Anwendungsfeld für neue Werkstoffe kann in zwei wesentliche Felder unterteilt werden. Die Nutzung als Schneidstoff oder als Verschleißschutz. Als Basis für die Nutzung von Hartstoffen für Anwendungen mit geometrisch bestimmten Schneiden im Anwendungsbereich der spanenden Gesteinszerkleinerung, können die Bohrversuche am Drehbohrversuchsstand genutzt werden. Dem gegenüber sind die im Fallwerk ermittelten Daten als Grundlage für eine Einschätzung der zu erwartenden Kräfte und Energieumsätze im Fall einer schlagenden Werkstoffbeanspruchung nutzbar.

Wie aus den Bohrversuchen hervorgeht, müssen die Schneiden mit wachsender Gesteinsfestigkeit auch in der Lage sein die hohen Reaktivkräfte aufzunehmen. Im Falle des Bohrens in Granit kommt es zu unzulässig hohen Pressungen an den Schneiden, in axialer und in Schnittrichtung. Die hervorstehenden, harten Mineralkörner im Falle des Anschnittvorganges bzw. bei ungenügendem Werkzeugandruck auf der Bohrlochsohle, führen zum punktuellen Auflaufen der Schneide auf ein Hindernis und verursachen einen schlagähnlichen Zustand. Infolgedessen besteht die Gefahr von Ausbrüchen im Schneidmaterial. Für die Anwendung in harten Formationen ist somit auf die schlagenden Untersuchungen zu verweisen, um die auftretenden Flächenpressungen an den Schneiden zu quantifizieren. Die aus den Bohrversuchen ermittelten Flächenpressungen in Schnittrichtung erreichten hierbei Werte von bis zu $852,6 \text{ N/mm}^2$, in Vorschubrichtung bis zu $1190,38 \text{ N/mm}^2$. Als Weiteres Kriterium kann die Verschleißbeständigkeit herangezogen werden. Beispiele für gut spanbare und zugleich verschleißintensive Bohrungen konnten beim Postaer Sandstein gefunden werden. Hier lagen die Verschleißwerte mit konventionellen Materialien im Bereich von $4\text{--}17 \text{ kg/m}^3$, bei near-nano WC-Co von $1,2\text{--}10,8 \text{ kg/m}^3$. Untersuchungen in Form von tribologischen Betrachtungen können ebenfalls mit in die Bohrbarkeitsbewertungen aufgenommen werden. Anhand der Versuche sind qualitativ vergleichende Bewertungen des Schneidenverschleißes in Form von Schädigungscharakteristika möglich. Eine quantitative Aussage kann anhand von gegebenen oder versuchstechnisch ermittelten Verschleißraten gegeben werden.

Die Fallwerksversuche untersuchten schlagende Einwirkungen auf den Gesteinslösevorgang. Als Rückkopplung können hieraus zu überwindende Andruckkräfte und spezifische Energien bestimmt werden. Weiterhin sind die dynamischen Festigkeiten, die gleich der zu überwindenden Flächenpressung sind, bei den Versuchen als Maß für die zu ertragenden Druckspannungen für die Schneidelemente zu sehen. Diese stellten sich bei den Versuchen in Rhyolith mit bis zu 2700 N/mm^2 . Durch die Gegenüberstellung der Aufschlag- und Rückprallgeschwindigkeiten sowie der potenziellen Energien sind

weiterhin Schlagwirkungsgrade für unterschiedliche Meißelinserts und Gesteine ermittelbar, welche als Basis für eine leistungsbezogene Betrachtung von Bohrvorgängen dienen.

6.2.3 Entwicklungsrichtung für den Einsatz von ultraharten Materialien

Aus der Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten des FHP entstanden klare Vorstellungen über die Widerstandsfähigkeit von Schneidstoffen. Diesen sollten neben einer hohen Härte ebenso möglichst duktil gestaltet werden. Der Widerstand gegen Druckbeanspruchung sollte nachweislich über der dynamischen Druckfestigkeit der zu bearbeitenden Gesteine liegen. Im Fall von Sandstein sind dies nach ARNOLD 660 N/mm^2 und bei Granit 3430 N/mm^2 . Diese Werte deckten sich mit den ermittelten mittleren Pressungen unter und vor den Schneiden für unterschiedliche Probegesteine. Dies gilt ebenso für den Einsatz als Schneid- sowie als Verschleißschutz. Im Falle von Schneidplatten ist auf eine genügende Unterstützung der Schneidelemente zu achten, um den Eintrag von Zugbeanspruchungen in den Schneidstoff zu vermeiden. Grundlegend sind die Härtewerte der Schneidstoffe möglichst hoch zu wählen. Die Testmaterialien, mit einer Härte HV von etwa 1600 konnten erfolgreich in Sandstein eingesetzt werden. Hierbei erzielten diese günstigere Verschleißraten als konventionelle Schneidplatten mit TiCN/TiN Beschichtungen. Einhergehend mit hoher Härte ist die Bruchzähigkeit der Werkstoffe zielgerichtet einzustellen. Da gerade im Anwendungsfall von Hartmetall die Härte oftmals mit einer niedrigeren Bruchzähigkeit erkaufte wird (siehe Abb. 2.15), sollte bei Einstellung der Eigenschaften diesem Kriterium besonderer Aufmerksamkeit angedacht werden. Die angewendeten neuen near-nano WC-Co Materialien erwiesen sich mit einer Bruchzähigkeit von um $8,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ als zu spröde um z.B. Granite bohrend zu bearbeiten. Die Bruchzähigkeiten sind somit höher zu wählen und durch Versuche zu beproben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Das effiziente Lösen von Gestein ist ein Schwerpunkt für die unterschiedlichsten Wirtschaftszweige. Ausgehend von der Gewinnung im Rohstoffsektor über den Transport bis hin zur abschließenden Bearbeitung von Werkstoffen. Neue Materialien bieten insbesondere in der Tiefengeothermie ein besonders hohes Optimierungspotenzial. Bei dieser beeinflussen die Kosten pro Bohrmeter maßgeblich den wirtschaftlichen Erfolg einer Tiefbohrung. Die erreichbare Bohrgeschwindigkeit der Bohrgarnitur und Standzeit der Verschleißteile bei harten und abrasiven Gesteinen wirken sich somit direkt auf das Ergebnis eines solchen Projektes aus.

Ausgangspunkt für die Bewertung von Bohrvorgängen ist das Gestein mit seinen Eigenschaften wie Korngrößen, ihre Bindung im Gefüge und die Art der Mineralkörner. Die in der Arbeit vorgestellten mechanischen Eigenschaften und Klassifizierungen umreißen die Wege, die Bearbeitbarkeit dieses Naturstoffes in eine für den Menschen fassbare Größenordnungen einzuteilen. Als gegensätzlicher Part werden die einzelnen Bohrverfahren, Schneidmaterialien und das Gebiet der Verschleißvorgänge bei der Gesteinszerstörung ausgeführt.

Für die Auslegung von neuen Werkstoffen werden zunächst Kenntnisse über die Prozesse während der Gesteinszerstörung benötigt. Zu diesem Zweck und unter Beachtung der zu erwartenden Probenvolumina wurde ein Kleinkaliberbohrversuchsstand entwickelt. Im Gegensatz zu den bisher in der Literatur genutzten Verfahren, welche schlagendes Bohren oder lineare Zerspanungsprozesse nutzen, setzt dieser Versuchsstand den Fokus auf spannende Bohrverfahren. Die Auswahl der Leistungsdaten, der Messmethodik und der Auswertung zielt auf eine energetische Beurteilung der Zerstörungsvorgänge. Im Laufe der Arbeit wurde ebenfalls eine Fallwerksversuchsstand modifiziert, um grundlegende Aussagen über Schlagereignisse beim Kontakt von Werkzeug und Gestein zu erhalten.

Als Basisanwendung wurde der Untersuchungsschwerpunkt auf die Nutzung als Schneidstoff für Festgesteine gelegt. Der Anwendungsfall stellte das grobspanende Bohren, wie

es durch PDC Meißel in der Tiefbohrtechnik genutzt wird, dar. Während der Untersuchung der grundlegenden Spanvorgänge konnten die Verläufe von Andruckkraft, Reaktivmoment und Bohrgeschwindigkeit beobachtet und detailliert gemessen werden. Anhand der Versuche mit Postaer Sandstein und weiterführend mit Schiefer und Kalzitmarmor konnte die Eignung der spanenden Gesteinszerstörung für Sedimentgesteine, wie sie bereits in der Tiefbohrtechnik angewendet wird, bestätigt werden. Die spanende Zerstörung von Gneis, Granit und Quarzporphyr wurde mit der vorhandenen Versuchsanlage innerhalb der Andruckgrenzen untersucht. Dabei wurde sich eine breite Streuung der Messwerte beobachtet. Messwert basierende Aussagen über die spanenden Gesteinszerstörungsprozesse wurden mit Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera verglichen und lieferten wichtige Erkenntnisse, vor allem bei der Zerspannung von harten Festgesteinen. Die Bohrprozesse bei Granit konnten hierbei nur annähernd in den Bereich einer volumetrischen Gesteinszerstörung gebracht werden. Die energetische Betrachtung bewies, dass die spezifische Energie bei der grobspanenden Gesteinszerstörung ermittelt werden kann. Die Ausbildung der verschiedenen spezifischen Energieverläufe während eines Bohrvorganges deutet auf das Vorhandensein verschiedener Phasen des Schneidvorganges hin. Folgend wurden Aussagen über Effizienz und Spanbarkeit des Gesteins mit dem jeweiligen Versuchsaufbau anhand von Energien und Flächenpressungsverhältnissen getroffen. Eine Abschätzung eines effektiven spanenden Bohrvorganges aus den Gesteinskennwerten in Zusammenhang mit der Quantifizierung der Belastungen an den geometrisch definierten Schneiden ist somit methodisch beschreibbar.

Um Informationen über die Auswirkungen schlagender Belastungen auf Schneiden bzw. Inserts bei der Gesteinszerstörung zu erhalten, wurden Fallwerksversuche durchgeführt. Es erfolgte zunächst eine Analyse der wirkenden Kräfte und der Eindringtiefe des Meißels in das Gestein. Dabei zeigte sich eine starke Abhängigkeit dieser Parameter von dem inhomogenen Aufbau des Gesteins. Die Auswertung der auftretenden Spannungen ergab, dass bei Schlägen zunächst die dynamische Druckfestigkeit die um ein Vielfaches höher ist, als die oftmals angegebene statische Druckfestigkeit, überwunden werden muss. Erst nach Passieren dieser Schwelle kann ein Eindringen des Meißels in das Gestein erfolgen. Die Betrachtung der Schlagenergien für unterschiedliche Eindringtiefen zeigte, dass diese zum Erreichen größerer Eindringtiefen exponentiell ansteigt. Die Ergebnisse der schlagenden Beanspruchung von Gesteinen lassen Aussagen über Eindringverhalten, Kratervolumen, eingesetzte Schlagenergien und spezifische Energien zu. Sie untermauern die bereits aus der Literatur bekannten Kennwerte für die Effektivität des Verfahrens und bilden die Basis für eine weitere Skalierung bei der Auslegung von neuen Werkzeugen. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen geben darüber hinaus noch einen visuellen Eindruck der Gesteinszerstörung während des Schlagvorganges.

Die in den Untersuchungen ermittelten spezifischen Energien bilden die Grundlage für weitergehende Abschätzungen des Energieaufwandes bei industriellen Prozessen, welche eine Zerkleinerung von Festgestein beinhalten und ermöglichen zielgerichtete Einstellung von Werkzeugparametern. Die Einbeziehung der Gesteinseigenschaften trägt maßgeblich zum ganzheitlichen Bild des Zerkleinerungsprozesses bei und bildet gleichermaßen den Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen.

Die Bereitstellung der im Projekt zum Einsatz kommenden neuen Materialien erfolgte nur in geringen Maße und die zu untersuchenden Proben waren stark limitiert. Die Verschleißbewertung beschränkte sich somit auf einen near-nano WC-Co Werkstoff. Die Aufnahme der qualitativen und quantitativen Verschleißerscheinungen erfolgte für die TiNC/TiN beschichteten und die neuen Schneidmaterialien im Kontakt mit unterschiedlichen Gesteinen.

7.2 Ausblick

Die durch Grundlagenuntersuchungen belegten Gesetzmäßigkeiten und Empfehlungen sind durch weitere spanende und schlagende Versuche zur Gesteinszerstörung zu validieren. Der abgeschlossene Weiterbau der Versuchsanlage für spanende Bohrverfahren bietet die Möglichkeit, grundlegende Untersuchungen mit neuen Schneidmaterialien auszudehnen und zu präzisieren. Auch die Prüfung unter tribologischen Gesichtspunkten für neue verschleißfeste Werkstoffe ist somit möglich. Als weiteren Ansatzpunkt sollten die Untersuchungen der spanenden Verfahren in Bezug auf die maximalen Druckfestigkeiten von Gesteinen stehen, welche noch technisch bearbeitbar sind.

Zur zielorientierten Untersuchung von Schlagereignissen sind weitere Versuche anzuregen. Hierbei sollten die Meißelgeometrien, Gesteinsarten und einzustellenden Einzelschlagenergien weiter variiert werden. In Bezug auf die Untersuchung von Schlagvorgängen sollte das geschwindigkeitsabhängige Bruchverhalten von unterschiedlichen Festgesteinen noch näher untersucht werden. Weiterhin könnte eine Versuchsreihe mit einem Autoklaven angestrebt werden, um den Einfluss von Umgebungsdrücken und Temperaturen auf das Bruchverhalten zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] GEOMASEK (Hrsg.): *Gesteinsmechanik*. <http://wwwuser.gwdg.de/~geomasek/gesteinsmechanik.htm>, Abruf: 01. Mai 2010
- [2] SANDVIK MINING AND SANDVIK CONSTRUCTION (Hrsg.): *Imlochhammer - 81.3 - 280 mm*. <http://www.directindustry.de/prod/sandvik-mining-and-sandvik-construction/imlochhammer-40142-431472.html>, Abruf: 24. Mai 2012
- [3] LAUSITZER GRANIT (Hrsg.): *Materialbeschreibung*. <http://www.lausitzergranit.de/materialbeschreibung.html>, Abruf: 14. Februar 2013
- [4] RATHSCHECK SCHIEFER UND DACH-SYSTEME ZN DER WILH. WERHAHN KG NEUSS (Hrsg.): *Mineralbestandteile und Materialwerte*. <http://www.rathscheck.de/Forum-fuer-Architekten/Schiefer-Kompendium/Einfuehrung/Mineralbestandteile-und-Materialwerte/>, Abruf: 13. Februar 2013
- [5] SÄCHSISCHE SANDSTEINWERKE GMBH (Hrsg.): *Postaer Sandstein*. http://www.sandsteinwerke.de/content.php?th=nav_3_2_0&lang=de, Abruf: 13. Februar 2013
- [6] *Keramik-Schneidplatte*. http://www.directindustry.de/prod/stellram/wendeplatten-5308-547210.html#product-item_6051. Version: 2010. – 00002
- [7] AADNØY, B. S. ; LOOYEH, R.: *Petroleum rock mechanics drilling operations and well design*. Oxford : Gulf Professional Pub., 2011 <http://site.ebrary.com/id/10477254>. – ISBN 9780123855466 0123855462 9780123855473 0123855470
- [8] ANTONYUK, S.: *Deformations- und Bruchverhalten von kugelförmigen Granulaten bei Druck- und Stoßbeanspruchung*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2009. – 286 S. : graph. Darst.
- [9] ARNOLD, W.: *Flachbohrtechnik : mit 114 Tabellen*. 1. Aufl. Leipzig [u.a.] : Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1993. – ISBN 9783342006404

- [10] ARTHUR, C. D.: The determination of rock material properties to predict the performance of machine excavation in tunnels. In: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology - Q J ENG GEOL HYDROGEOL* 29 (1996), Nr. 1, S. 67–81. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.05>. – DOI 10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.05
- [11] AUTORENKOLLEKTIV: *Arbeitsblatt 7 - Gesellschaft für Tribologie*. August 2002
- [12] AZAR, J.: *Drilling engineering*. Tulsa Okla. : PennWell Corp., 2007. – ISBN 9781593700720
- [13] BARGEL, H. (Hrsg.) ; SCHULZE, G. (Hrsg.): *Werkstoffkunde*. 9. Springer Berlin Heidelberg, 2005. – ISBN 978-3-540-26107-0
- [14] BELOHLAVEK, K.-U.: *Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Gesteinsfestigkeitseigenschaften und Kenngrößen der Gesteinszerstörung durch einzelne Bohrzähne zur Beschreibung des Bohrens mit Rollenbohrwerkzeugen*, Freiberg, TU Bergakademie, Diss., 2006. – 138 S. : graph. Darst.
- [15] BERTRAM, A.: *Bruchenergie laufender Risse in Gestein*, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2008. – 150 S. : graph. Darst.
- [16] BESTE, U. ; JACOBSON, S. ; HOGMARK, S.: Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling. In: *Wear* 264 (2008), Mai, Nr. 11-12, 1142 - 1151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.029>. – DOI 10.1016/j.wear.2007.01.029. – ISSN 0043-1648
- [17] BHUSHAN, B. ; GUPTA, B. K.: *Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments*. Krieger Pub. Co., 1997. – ISBN 1575240505 9781575240503
- [18] BIENIAWSKI, Z. T.: *Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York : Wiley, 1989. – ISBN 0471601721 9780471601722
- [19] BRANDON, B.D. ; J.CERKOVNIK ; KOSKIE, E. ; COLSTON, F. ; CLAYTON, R.I. ; HOLLISTER, K.T. ; SENGHER, J. ; NIEMI, R.: First Revision to the IADC Fixed Cutter Dull Grading System. In: *IADC/SPE 23939* (1992)
- [20] CZICHOS, H. ; HABIG, K. H.: *Tribologie-Handbuch Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9660-5>. – ISBN 9783834896605 3834896608 9783834800176 3834800171

- [21] CZUDAJ, K.: *Beitrag zur Optimierung des spangebenden Gesteinsbohrens*, Freiberg, TU Bergakademie, Diss., 1974. – 94 S.
- [22] DEGNER, W.: *Spanende Formung: Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 15., neu bearb. Aufl. München : Hanser, 2002. – ISBN 9783446221383
- [23] Norm DIN 18196 2006. *Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*
- [24] Norm DIN 18300 2006. *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) Erdarbeiten*
- [25] Norm DIN 18312 2002. *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) Untertagebauarbeiten*
- [26] Norm DIN 20301 1999. *Gesteinsbohrtechnik - Begriffe, Einheiten, Formelzeichen*
- [27] Norm DIN 4957 2001. *Werkzeugstähle*
- [28] Norm DIN 50320 1979. *Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes*
- [29] Norm DIN 50323 1979. *Verschleiß-Meßgrößen*
- [30] Norm DIN 50323 1995. *Tribologie - Verschleiß*
- [31] Norm DIN 52108 2010. *Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe, Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme, Schleifscheiben-Verfahren*
- [32] Norm DIN 8580 2003. *Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung*
- [33] Norm DIN EN ISO 14688-1 2002. *Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden Teil 1 Benennung und Beschreibung*
- [34] Norm DIN EN ISO 14688-2 2004. *Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden Teil 2 Grundlagen für Bodenklassifizierungen*
- [35] Norm DIN EN ISO 14689-1 2004. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung, Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels Teil 1: Benennung und Beschreibung*
- [36] Norm DIN ISO 513 2005. *Klassifizierung und Anwendung von harten Schneidstoffen für die Metallzerspanung mit geometrisch bestimmten Schneiden - Bezeichnung der Hauptgruppen und Anwendungsgruppen*

- [37] DUBBEL, H.: *Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20., neubearb. u. erw. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2001. – ISBN 9783540677772
- [38] ERSOY, A. ; WALLER, M. D.: Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling. In: *Wear* 188 (1995), Nr. 1-2, 150 - 165. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0029376253&partnerID=40>
- [39] FISCHÖTTER, P.: *Untersuchung über die Gesetzmäßigkeiten beim drehenden Gesteinsbohren*, Bergakademie Clausthal, Diss., 1963. – 138 S. : graph. Darst.
- [40] FJAER, E.: *Petroleum related rock mechanics*. Amsterdam; Boston : Elsevier, 2008 <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=2272>. – ISBN 9780080557090 0080557090 9780444502605 0444502602
- [41] FOWELL, R. J. ; BAKAR, M. Z.: A Review of the Cerchar And LCPC Rock Abrasivity Measurement Methods. (2007). <http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=ISRM-11CONGRESS-2007-035&societyCode=ISRM>
- [42] FÖRSTER, W.: *Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine*. Teubner Studienbücherei, 1996
- [43] GABOLDE, G.: *Drilling data handbook*. 8th ed., completely rev. and expanded. Paris : Editions Technip, 2006. – ISBN 9782710808718
- [44] GENSKE, D. D.: *Ingenieurgeologie : Grundlagen und Anwendung*. Berlin : Springer, 2006. – XIV, 588 S. :
- [45] GOLSER, J. ; ASSOCIATION, International T.: *Tunnels for people : World Tunnel Congress '97, Vienna, Austria : proceedings, 23rd General Assembly of the International Tunnelling Association, 12-17 April 1997*. Rotterdam : A.A. Balkema, 1997. – ISBN 9789054108689
- [46] GRAZ, TU: *Scriptum Felsmechanik und Tunnelbau*. 2007
- [47] GROSS, D. ; SEELIG, T.: *Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikro-mechanik*. 5. erw. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – ISBN 978-3-642-10196-0
- [48] HOEK, E. ; BROWN, E.T.: Underground Excavations in Rock. In: *The Institution of Mining and Metallurgy* (1980)
- [49] KÜHN, G.: Die Mechanik des drehenden Bohrens - verfahrenstechnisch gesehen. In: *BMT: Baumaschine + Bautechnik* 37 (1990), Nr. 3, S. 279 – 297. – ISSN 0005-6693

- [50] KIRSTEN, U. ; LEHMANN, F. ; MANDEL, K. ; REICH, M. ; KRÜGER, L.: *Untersuchung der Mechanismen bei der schlagenden Gesteinszerstörung und Vergleich mit Versuchen an einem Laborversuchsstand*
- [51] KLOCKE, F. ; KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren*. 8., neu bearb. Aufl. Düsseldorf [u.a.] : VDI-Verl. [u.a.], 2008. – ISBN 9783540234586
- [52] KNAPPSTEIN, G.: *Kinematik und Kinetik: Arbeitsbuch mit ausführlichen Aufgabenlösungen, Grundbegriffen, Formeln, Fragen, Antworten*. Deutsch. – ISBN 3817117388 9783817117383
- [53] LATHAN, G.: *Bohr- und Schiessarbeiten im Bergbau*. Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, VEB, 1960
- [54] LAUFFER, H.: *Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau*. Geologie und Bauwesen 24, 1958
- [55] LEHMANN, F. ; KIRSTEN, U. ; MANDEL, K. ; KONIECZNY, T.: Experimentelle Untersuchung der Wirkmechanismen der schlagenden Gesteinszerstörung zur Beschreibung des Bohrens im Hartgestein. In: *Plenarvortrag und Tagungsbericht zum 4. Internationalen Kolloquium zur sprengstofflosen Gesteinsgewinnung* (2012). ISBN 978–3–941721–16–6
- [56] LEHMANN, F. ; KIRSTEN, U. ; MANDEL, K. ; REICH, M. ; KRÜGER, L.: Untersuchung der Mechanismen bei der schlagenden Gesteinszerstörung und Vergleich mit Versuchen an einem Laborversuchsstand. In: *DGMK-Tagungsbericht 2012-2* (2012), April, S. 193 – 201. ISBN 978–3–941721–25–8
- [57] LINDNER, H.: *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*. 8., neu bearbeitete Aufl. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004. – ISBN 9783446225466
- [58] LUY, R.: *Untersuchung zur Wirksamkeit des Bohrprozesses beim drehschlagenden Bohren unter hohen hydrostatischen Drücken*, Clausthal, TU Bergakademie, Diss., Diss., 1992. – 143 S. : graph. Darst.
- [59] LYONS, W. C. ; PLISGA, G. J.: *Standard handbook of petroleum & natural gas engineering*. Gulf Professional Pub. <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSHPNGEEA>
- [60] MAIDL, B.: Klassifizierung der Gesteine nach der Bohrbarkeit. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 4 (1972), Juni, Nr. 1, 25 - 44. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01239211>. – DOI 10.1007/BF01239211

- [61] MANDEL, K.: *Untersuchungen zum feldaktivierten Sintern und zum geschwindigkeitsabhängigen Festigkeits- und Versagensverhalten von near-nano WC-Co-Hartstoffen unter Druckbeanspruchung*, Freiberg, TU Bergakademie, Diss., 2013. – 177 Seiten S.
- [62] MANDEL, K. ; KIRSTEN, U. ; KRÜGER, L. ; REICH, M.: *FAST Sintered Tungsten Carbide Cobalt Material for Applications in Rock Destruction*, 2011
- [63] MARKL, G.: *Minerale und Gesteine : Mineralogie - Petrographie - Geochemie*. 2., neu bearb. u. stark erw. Aufl. Heidelberg Neckar : Spektrum Akademischer Verlag, 2008. – ISBN 9783827418043
- [64] MCGEHEE, D.Y. ; DAHLEM, J.S. ; GLECK, J.C. ; KOST, B. ; LAFUZE, D. ; REINSVOLD, C.H. ; STEINKE, S.C.: *The IADC Roller Bit Dull Grading System*. In: *IADC/SPE 23938* (1992)
- [65] MOSELEY, S. G. ; BOHN, K.-P. ; GOEDICKEMEIER, M.: *Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PCD) cutters: Wear and fracture mechanisms*. In: *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 27 (2009), März, Nr. 2, 394 - 402. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.11.014>. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2008.11.014. – ISSN 0263–4368
- [66] NAUMANN, O.: *Fertigung dünner scheibenförmiger Werkstücke aus Silizium - Drattrennlappen, Diamant-Drattrennschleifen, Elektrochemisches Trennen*. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (2009)
- [67] NICKEL, F.: *Untersuchungen des Bohrprozesses mit imprägnierten Diamantbohrkronen unterschiedlicher Schneidengeometrie im Hartgestein*. Bd. 1. Aufl. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss. Papierflieger, 1994
- [68] NIU, D.: *Rigid Impact - the Mechanism of Percussive Rock Drilling*. In: *42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium* <http://www.onepetro.org/mslib/app/Preview.do?paperNumber=ARMA-08-075&societyCode=ARMA>
- [69] ORTEGA, A. ; GLOWKA, D. A.: *Studies of the frictional heating of polycrystalline diamond compact drag tools during rock cutting*. 1982 <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5281848-1SGJm0/>. – ISBN SAND–80–2677; Other: ON: DE82018632 United States10.2172/5281848Other: ON: DE82018632Mon May 14 08:18:26 EDT 2007NTIS, PC A07/MF A01.SNL; ERA–07–046499; EDB–82–123599English

- [70] PARRY, R.: *Mohr circles, stress paths, and geotechnics*. 1st ed. London; New York : Spon, 1995. – ISBN 9780419192909
- [71] PLINNINGER, R. J.: *Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein*. Reihe B: Heft 17. Münchner Geol. Hefte, 2002. – Verschleiß-Grundlagen mit Begriffsdefinitionen und Allgemeinem, Verschleißarten 5 - Werkzeugverschleiß
- [72] PLINNINGER, R. J.: Praktische Aspekte der Abrasivitätsuntersuchung und Verschleißprognose mit den Cerchar-Abrasivitätstest (CAI). In: Moser, M.: *Veröffentlichungen von der 15. Tagung Ingenieurgeologie*. Erlangen 2005 : 15. Tagung für Ingenieurgeologie Erlangen, 2005, S. 371 – 375
- [73] PLINNINGER, R. J.: Abrasivitätsbewertung in Festgesteinen mit dem Rock Abrasivity Index RAI - Erfahrungen aus acht Jahren Anwendung. In: *Geotechnik* 2 (2010), Nr. 33, S. 185 – 189
- [74] PRINZ, H.: *Abriß der Ingenieurgeologie*. München : Elsevier, Spektrum Akad. Verl., 2006. – ISBN 3827415934 9783827415936. – Cited by 0000
- [75] RABIA, H.: Specific energy as a criterion for drill performance prediction. 19 (1982), Nr. 1, 39-42. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)90709-4](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(82)90709-4). – DOI 10.1016/0148-9062(82)90709-4. – ISSN 0148-9062
- [76] RABIA, H.: A unified prediction model for percussive and rotary drilling. In: *Mining Science and Technology* 2 (1985), Juni, Nr. 3, 207 - 216. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9031\(85\)90149-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9031(85)90149-5). – DOI 10.1016/S0167-9031(85)90149-5. – ISSN 0167-9031
- [77] RAO, K.: *Principles of rock drilling*. Rotterdam ;;Brookfield Vt. : Balkema, 1998. – ISBN 9789054107880
- [78] REICH, M.: *Untersuchung komplexer Bohrgarnituren mit integriertem Erweitерungswerkzeug*, TU Bergakademie Freiberg, Diss., 2003. – 138 S. : graph. Darst.
- [79] REICH, M.: *Grundlagen der Bohrtechnik*. 2006. – Vorlesungsskript
- [80] REICHENBÄCHER, H.: *Trennen mineralischer Werkstoffe mit geometrisch bestimmten Schneiden*. Kassel university press GmbH, 2010. – ISBN 9783899588361
- [81] RINEHARDT, J. S.: Dynamic fracture strength of rocks. In: *Proceedings of the Seventh Symposium on Rock Mechanics* (1965), S. 205 – 208

- [82] SCHIMAZEK, J. ; KNATZ, H.: Der Einfluß des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. In: *Glückauf 106* (1970), Nr. 5, S. 274–278
- [83] SCHNELLI, O. ; MARTI, D. ; MAURHOFER, St. ; BOLLIGER, J.: Uetlibergtunnel: Schlüsselbauwerk der Westumfahrung Zürich. In: *Tunnel 25* (2002), Nr. 4, S. 58 – 71. – ISSN 1421–2811
- [84] SCHÖNHERR, H.: *Spanende Fertigung*. München [etc.] : Oldenbourg, 2002. – ISBN 9783486250459
- [85] SCHUBERT, H. (Hrsg.): *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Schüttgut*. Wiley-VCH, 2003 [http](http://dx.doi.org/10.1002/9783527305773). – ISBN 9783527305773
- [86] SCHUMANN, W.: *Der grosse BLV-Steine- und Mineralienführer : Mineralien, Erze, Edelsteine, Gesteine, Meteorite ; [das Standardwerk für jeden Sammler]*. München : blv, 2007. – ISBN 9783835402126 3835402129
- [87] SCHWATE, W.: *Handbuch Gesteinsbohrtechnik*. Bd. 1. Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1983
- [88] SEBASTIAN, U.: *Gesteinskunde ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender*. Heidelberg : Spektrum Akad. Verl., 2009. – ISBN 9783827420244
- [89] SIEVERS, H.: *Neue Prüfverfahren zur Bestimmung der Bohrbarkeit*. 1948
- [90] SUANA, M. ; PETERS, T.: The Cerchar Abrasivity Index and its relation to rock mineralogy and petrography. In: *Rock mechanics* 15 (1982), Juni, Nr. 1, 1–8. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01239473>. – DOI 10.1007/BF01239473. – ISSN 0035–7448, 1434–453X
- [91] TEALE, R.: The concept of specific energy in rock drilling. 2 (1965), Nr. 1, 57–73. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7). – DOI 10.1016/0148–9062(65)90022–7. – ISSN 0148–9062
- [92] THURO, K.: Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb: Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. In: *Münchner Geol. Hefte* (1996), Nr. Reihe B, Heft 1: Angewandte Geologie
- [93] TZE-PIN, L. ; HOOD, M. ; COOPER, G. A. ; XIAOHONG, L.: Wear and failure mechanisms of polycrystalline diamond compact bits. In: *Wear* 156 (1992), Juli, Nr. 1, 133 – 150. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90149-3](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(92)90149-3). – DOI 10.1016/0043–1648(92)90149–3. – ISSN 0043–1648

-
- [94] WAGNER, H.: Der Mechanismus der Spanentstehung beim Zerspanen von Gesteinen. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 3 (1971), Nr. 3, 159 - 174. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01238441>. – DOI 10.1007/BF01238441
- [95] WEG: *Fachkunde Metall*. 53., überarb. Aufl., 1. Dr. Haan-Gruiten : Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, 1999. – ISBN 9783808511534
- [96] WEG: *Reserven und Ressourcen - Potenziale für die zukünftige Erdgas- und Erdölversorgung*. 2008 <http://www.erdoel-erdgas.de/filemanager/download/26/Reserven%20und%20Ressourcen.pdf>. – Published: Online PDF
- [97] WELTERMANN, J.: *Untersuchung der Wirksamkeit hydraulischer Bohrhämmer zur Optimierung des Hartgesteinbohrens*, Clausthal, TU Bergakademie, Diss., 1990. – 142 S. : graph. Darst.
- [98] WIRTH: *Bohrtechnisches Handbuch*. WIRTH Maschinen- und Bohrgeräte-Fabrik GmbH, 2004

Tabellenverzeichnis

2.1	Einstufung in Boden und Felsklassen nach DIN 18300 [24]	18
2.2	Einteilung der Vortriebsklassen nach DIN 18312 [25]	19
2.3	Chemische Zusammensetzung von Hartstoff-Werkstoffen	37
2.4	Anwendungsgebiete von Hartstoffen	38
2.5	Härten von superharten Schneidstoffen	42
2.6	Herstellung keramischer und monokristalliner Hartstoffe	44
2.7	Typische Verschleißerscheinungsformen durch die Hauptverschleißme- chanismen	49
2.8	Typische Verschleißerscheinungsformen durch die Hauptverschleißme- chanismen [11]	50
3.1	Klassifizierung nach PROTODJAKONOV [53]	53
3.2	Klassifikation von Abrasivitäten für Gesteinsmaterial nach ARTHUR [10]	55
3.3	Einflussgrößen auf den Schnittvorgang [22]	55
3.4	Wirkmechanismen Spanentstehung nach Abb. 3.5	59
3.5	Zusammensetzung der Schnittenergie	59
3.6	Verschleißerscheinungen an PDC Schneidelementen nach MOSELEY [65]	74
3.7	Verschleißerscheinungen nach ORTEGA [69]	75
5.1	Streuung der mittleren spez. Energien aus den Bohrversuchen	110
5.2	Mittlere Verschleißwerte der Schneidplatten beim Bohren von unter- schiedlichen Gesteinen	115
5.3	Verschleißwerte der Schneidplatten beim Bohren von Sandstein bei glei- chen eingestellten Andruckwerten	119

Abbildungsverzeichnis

2.1	System der Gesteinslösung nach BELOHLAVEK [14]	17
2.2	Beschreibung von Fels für bautechnische Zwecke nach DIN EN ISO 14689 [35]	22
2.3	Vergleichbarkeit von Härteskalen nach ARNOLD [9]	23
2.4	Prüfmethoden von Festgestein nach SEBASTIAN [88]	24
2.5	Einteilung der Gesteine nach ihren allgemeinen Verformungseigenschaf- ten nach ARNOLD [9]	25
2.6	Modellvorstellung nach dem MOHR-COULOMB'schen Versagenskriteri- um [46]	27
2.7	Spannungstensor für triaxialen Fall	28
2.8	Bruchhüllkurve um MOHR'sche Spannungskreise mit dem nichtlinearen HOEK BROWN Kriterium [46]	29
2.9	Elliptischer Riss mit den Versagenspunkten (P) nach GRIFFITH [70] . .	30
2.10	Druckverläufe unterschiedlicher Wellentypen	31
2.11	Werte für Schwellendruck und Gesteinsdruckfestigkeit nach ARNOLD [9]	33
2.12	Härteskala nach SCHREINER [9]	34
2.13	Cerchar abrasivity test [72]	35
2.14	Bestimmung von Abriebfestigkeiten nach BÖHME [1]	35
2.15	Bruchzähigkeit und Verschleißbeständigkeit in Abhängigkeit der Härte bei Wolframcarbid nach LYONS [59]	36
2.16	Einsatzgebiete von Schneidstoffen nach KLOCKE [51]	37
2.17	Eingelötete Hartmetalle an einer Schlitzwandfräse der Firma BAUER .	41
2.18	Keramische Schneidstoffe im Maschinenbau [6]	42
2.19	Diamanten auf Sägeband zur Waferbearbeitung nach NAUMANN [66] .	43
2.20	Meißel aus der Tiefbohrtechnik mit PCD-Plättchen	43
2.21	Schema der Einflussgrößen in einem Tribosystem nach CZICHOS [20] und DUBBEL [37]	46
2.22	Schema eines tribologischen Systems [11]	48
3.1	Zusammenhang des Verschleißkoeffizienten nach SCHIMAZEK und des Materialverlustes [82]	54

3.2	Zusammenhang des Verschleißkoeffizienten nach SCHIMAZEK und der entstehenden Verschleißfläche nach dem CERCHAR Abrasivitätstest nach ARTHUR [10]	55
3.3	Modell des spanenden Gesteinslösevorganges nach REICHENBÄCHER [80]	56
3.4	Schnittkraftdiagramm beim Zerspanen eines Witwatersrand-Quarzites nach WAGNER [94]	57
3.5	Modellbildung Spanabtrag nach DUBBEL [37]	58
3.6	Gesteinszerstörungsprozess eines Rollenmeißelzahn nach LUY [58] . .	61
3.7	Kraterbildung beim schlagenden Bohren nach ARNOLD [9]	62
3.8	Elastisch-plastischer Stoßvorgang nach ANTONYUK [8]	62
3.9	Verschiedene Schlagbohrköpfe [9]	64
3.10	Bereitstellung des Schlagimpulses nach KIRSTEN [50]	67
3.11	Verschiedene Größen von Imlochhämmern [2]	68
3.12	Aufbau Rollenmeißel nach ARNOLD [9]	69
3.13	Ausbildung des Zahnbesatzes bei wachsender Gesteinsfestigkeit (v. l. n. r.) nach REICH [79]	70
3.14	Oberflächenbesetzte Diamantbohrkrone	71
3.15	Imprägnierte Dimantbohrkrone	71
3.16	PDC Meißel	71
3.17	Eingesetzte Hartmetallstifte im Kontaktbereich zum Gestein	73
3.18	Hartauftrag auf einem Bauteil, welches durch große Materialströme von Lockergestein belastet wird	73
3.19	Entstehung schleifender Verschleiß [93]	76
3.20	Darstellung des Verschleißbildes [93]	76
3.21	Verschleißmechanismus beim microchipping [93]	77
3.22	Mikroabsplitterungen an einer PKD-Schneide [65]	77
3.23	Verschleißmechanismus des gross fracturing [93]	77
3.24	Grobe Ausbrüche an einem PKD-Probekörper [65]	77
3.25	Heat checking an einem Probekörper [93]	78
3.26	Chemischer Verschleiß an einem PKD-Probekörper [65]	78
3.27	Ausbildung tiefer Gesteinskänale nach BESTE [16]	79
4.1	Bohrversuchsstand mit Messtechnik und mechanisches Vorschubsystem	81
4.2	Messwelle des Bohrversuchsstandes zum spanenden Bohren	82
4.3	Träger für konventionelle Wendeschneidplatten aus dem Maschinenbau	83
4.4	Träger für Schneidmaterialien aus neuen Werkstoffen	83
4.5	Verbesserter Versuchsstand mit Linearachse und SPS Steuerung	84
4.6	Linearachse mit Träger für Drehantrieb	84
4.7	Fallwerksversuchsstand	85

4.8	Versuchsaufbau	85
4.9	Testergebnisse von Härte und Bruchzähigkeit nach MANDEL [62]	88
4.10	Werkstoffproben nach dem Sintern nach MANDEL [62]	89
4.11	Schneidplatten nach der Bearbeitung	89
4.12	Schlagbohrkopf	89
4.13	Eingelötetes Insert	89
5.1	Bohrverlaufdiagramm für Postaer Sandstein	94
5.2	Zerspanen von Postaer Sandstein bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 2200 N	95
5.3	Bohrverlaufdiagramm für Schiefer	96
5.4	Zerspanen von Schiefergestein bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 2500 N	97
5.5	Bohrverlaufdiagramm für Kalzitmarmor	98
5.6	Zerspanen von Kalzitmarmor bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} und ei- nem mittleren Andruck von 3000 N	99
5.7	Bohrverlaufdiagramm für Lausitzer Granit	100
5.8	Zerspanen von Lausitzer Granit bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 3800 N	101
5.9	Bohrverlaufdiagramm für Quarzporphyr	102
5.10	Zerspanen vom Quarzporphyr bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 4600 N	103
5.11	Bohrverlaufdiagramm für Freiburger Gneis	104
5.12	Zerspanen von Freiburger Gneis bei einer Drehzahl von 100 min^{-1} und einem mittleren Andruck von 3500 N	105
5.13	Schnitttiefe als Funktion der mittleren Andruckkräfte für unterschiedli- che Gesteine	106
5.14	Abhängigkeit der Schnitttiefe von der Flächenpressungen unter den Schnei- den für unterschiedliche Gesteine	107
5.15	Spezifische Energie in Abhängigkeit der erreichten mittleren Schnitttie- fen für unterschiedliche Gesteine	107
5.16	Ermittelte spez. Energien für Sandstein bei unterschiedlichen Drehzah- len und Andruckkräften	108
5.17	Spez. Energien für Sandstein bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flä- chenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte	108
5.18	Ermittelte spez. Energien für Schiefer bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften	109
5.19	Spez. Energien für Schiefer bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flä- chenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte	109

5.20	Ermittelte spez. Energien für Kalzitmarmor bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften	109
5.21	Spez. Energien für Kalzitmarmor bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte	109
5.22	Ermittelte spez. Energien für Gneis bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften	109
5.23	Spez. Energien für Gneis bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte	109
5.24	Ermittelte spez. Energien für Granit bei unterschiedlichen Drehzahlen und Andruckkräften	110
5.25	Spez. Energien für Granit bei unterschiedlichen Drehzahlen und Flächenpressungen mit einer gleitenden Mittlung über 50 Werte	110
5.26	Bezogene spezifische Energien als Funktion der Flächenpressungsverhältnisse	111
5.27	Verschleißraten (dW_m/dV) konventioneller Schneidplatten mit TiCN/TiN Beschichtung für die getesteten Gesteine	112
5.28	Verschleißraten konventioneller Schneidplatten mit TiCN/TiN Beschichtung für Sandstein, Kalzitmarmor und Schiefer	113
5.29	Abrasiver Verschleiß an einer Schneidplatte im Außenbreich	113
5.30	Abrasiver Verschleiß entlang einer Schneidkante	113
5.31	Ausbrüche in Richtung der Bohrachse an einer Schneidplatte im Außenbereich	114
5.32	Ausbrüche in Richtung der Bohrachse entlang einer Schneidkante . . .	114
5.33	Verschleiß infolge zu hoher Schnittkräfte im Außenbereich einer Schneidplatte	114
5.34	Probenplattenfixierung mit Klemmschrauben	115
5.35	Probenfixierung mittels Klemmpratzen	115
5.36	Zerstörte Innenplatte	116
5.37	Zerstörte Außenplatte	116
5.38	Bohrverlaufdiagramm für Freiburger Gneis mit neuen Materialien . . .	117
5.39	Ausbrüche auf der Innenplatte aus neuem Material	117
5.40	Ausbrüche auf der Außenplatte aus neuem Material	117
5.41	Bohrverlaufdiagramm für Postaer Sandstein mit neuen Materialien . .	118
5.42	Abrasiver Verschleiß der Innenplatte aus neuem Material	118
5.43	Abrasiver Verschleiß der Außenplatte aus neuem Material	118
5.44	Verschleißversuche mit neuen Materialien	119
5.45	Kraft am Meißel in Abhängigkeit der Eindringtiefe in das Gestein für Fallhöhen zwischen 20 und 100 mm	120

5.46	Spannungen unter dem Meißel in Abhängigkeit der Eindringtiefe in das Gestein für Fallhöhen zwischen 20 und 100 <i>mm</i>	121
5.47	Geschwindigkeit des Meißels in Abhängigkeit der Eindringtiefe in das Gestein für Fallhöhen zwischen 20 und 100 <i>mm</i>	122
5.48	(Aufnahmen vom Aufschlagen und Zurückfedern der Meißelspitze mittels Hochgeschwindigkeitskamera für Rhyolith, Fallhöhe 60 <i>mm</i> , Fallgewicht 194 <i>kg</i>)	123
5.49	(Aufnahmen der Fallwerksversuche mit einem Meißelinsert für a) Rhyolith, b) Gabbro, c) Quarzit nach LEHMANN [55]	124
5.50	Einzelschlagenergie am Versuchsaufbau für einen Flachmeißel in Abhängigkeit der Eindringtiefe in Rhyolith	125
5.51	Kraft- und Wegverlauf für einen Versuch mit 10 <i>mm</i> Fallhöhe, einem Meißel mit Längsschneide und Rhyolith als Gestein	125
5.52	Erreichte Eindringtiefe in Abhängigkeit der Einzelschlagenergie	126
5.53	Spezifische Energie in Abhängigkeit der aufgebrachten Einzelschlagenergie	127
A.1	Bohrversuch 2011-03-23-13 in Postaer Sandstein	155
A.2	Bohrversuch 2011-03-23-14 in Postaer Sandstein	155
A.3	Bohrversuch 2011-03-23-15 in Postaer Sandstein	156
A.4	Bohrversuch 2011-03-23-16 in Postaer Sandstein	156
A.5	Bohrversuch 2011-03-24-17 in Postaer Sandstein	157
A.6	Bohrversuch 2011-03-24-18 in Postaer Sandstein	157
A.7	Bohrversuch 2011-03-24-19 in Postaer Sandstein	158
A.8	Bohrversuch 2011-03-24-20 in Postaer Sandstein	158
A.9	Bohrversuch 2011-03-25-21 in Postaer Sandstein	159
A.10	Bohrversuch 2011-03-25-22 in Postaer Sandstein	159
A.11	Bohrversuch 2011-03-25-23 in Postaer Sandstein	160
A.12	Bohrversuch 2011-03-25-24 in Postaer Sandstein	160
A.13	Bohrversuch 2011-03-30-37 in Schiefer	161
A.14	Bohrversuch 2011-03-30-38 in Schiefer	161
A.15	Bohrversuch 2011-03-30-39 in Schiefer	162
A.16	Bohrversuch 2011-03-30-40 in Schiefer	162
A.17	Bohrversuch 2011-03-30-41 in Schiefer	163
A.18	Bohrversuch 2011-03-30-42 in Schiefer	163
A.19	Bohrversuch 2011-03-30-44 in Schiefer	164
A.20	Bohrversuch 2011-03-30-45 in Schiefer	164
A.21	Bohrversuch 2011-03-30-46 in Schiefer	165
A.22	Bohrversuch 2011-03-30-47 in Schiefer	165

A.23 Bohrversuch 2011-03-16-03 in Kalzitmarmor	166
A.24 Bohrversuch 2011-03-16-04 in Kalzitmarmor	166
A.25 Bohrversuch 2011-03-16-05 in Kalzitmarmor	167
A.26 Bohrversuch 2011-03-16-06 in Kalzitmarmor	167
A.27 Bohrversuch 2011-03-16-07 in Kalzitmarmor	168
A.28 Bohrversuch 2011-03-16-08 in Kalzitmarmor	168
A.29 Bohrversuch 2011-03-17-09 in Kalzitmarmor	169
A.30 Bohrversuch 2011-03-17-10 in Kalzitmarmor	169
A.31 Bohrversuch 2011-03-17-11 in Kalzitmarmor	170
A.32 Bohrversuch 2011-03-28-29 in Kalzitmarmor	170
A.33 Bohrversuch 2011-03-28-30 in Kalzitmarmor	171
A.34 Bohrversuch 2011-03-28-31 in Kalzitmarmor	171
A.35 Bohrversuch 2011-03-28-32 in Kalzitmarmor	172
A.36 Bohrversuch 2011-06-21-02 in Freiburger Gneis	173
A.37 Bohrversuch 2011-07-11-03 in Freiburger Gneis	173
A.38 Bohrversuch 2011-07-11-04 in Freiburger Gneis	174
A.39 Bohrversuch 2011-07-11-05 in Freiburger Gneis	174
A.40 Bohrversuch 2011-07-11-06 in Freiburger Gneis	175
A.41 Bohrversuch 2011-07-11-08 in Freiburger Gneis	175
A.42 Bohrversuch 2011-03-28-26 in Lausitzer Granit	176
A.43 Bohrversuch 2011-03-28-27 in Lausitzer Granit	176
A.44 Bohrversuch 2011-03-28-28 in Lausitzer Granit	177
A.45 Bohrversuch 2011-03-29-33 in Lausitzer Granit	177
A.46 Bohrversuch 2011-03-29-34 in Lausitzer Granit	178
A.47 Bohrversuch 2011-03-30-35 in Lausitzer Granit	178
A.48 Bohrversuch 2011-03-30-36 in Lausitzer Granit	179
B.1 Bohrversuch 2011-08-24-01 in Freiburger Gneis	181
B.2 Bohrversuch 2011-08-24-02 in Postaer Sandstein	182
B.3 Bohrversuch 2011-08-25-03 in Postaer Sandstein	182
B.4 Bohrversuch 2011-08-25-05 in Postaer Sandstein	183
B.5 Bohrversuch 2012-05-09-01 in Postaer Sandstein	183
B.6 Bohrversuch 2012-05-09-02 in Postaer Sandstein	184
C.1 Ermittlung der Flächenpressungen an einem Schneidelement	186

Verzeichnis der Anhänge

A	Spangebendes Bohren mit konventionellen Schneidmaterialien	154
A.1	Bohrverlaufsdigramme Postaer Sandstein	155
A.2	Bohrverlaufsdigramme Schiefer	161
A.3	Bohrverlaufsdigramme Kalzitmarmor	166
A.4	Bohrverlaufsdigramme Freiburger Gneis	173
A.5	Bohrverlaufsdigramme Lausitzer Granit	176
B	Spangebendes Bohren mit neuen Schneidmaterialien	180
B.1	Bohrverlaufsdigramm Freiburger Gneis	181
B.2	Bohrverlaufsdigramme Postaer Sandstein	182
C	Berechnungen zu den spanenden Versuchen	185
C.1	Kompensation der Halbbrückenschaltungseffekte	185
C.2	Bestimmung der Flächenpressungen an den Schneiden	185
C.3	Schnitttiefen und spezifische Energien	187
C.3.1	Schnitttiefe	187
C.3.2	Spezifische Energie	187
D	Beigelegter Datenträger	188

A Spangebendes Bohren mit konventionellen Schneidmaterialien

A.1 Bohrverlaufsdigramme Postaer Sandstein

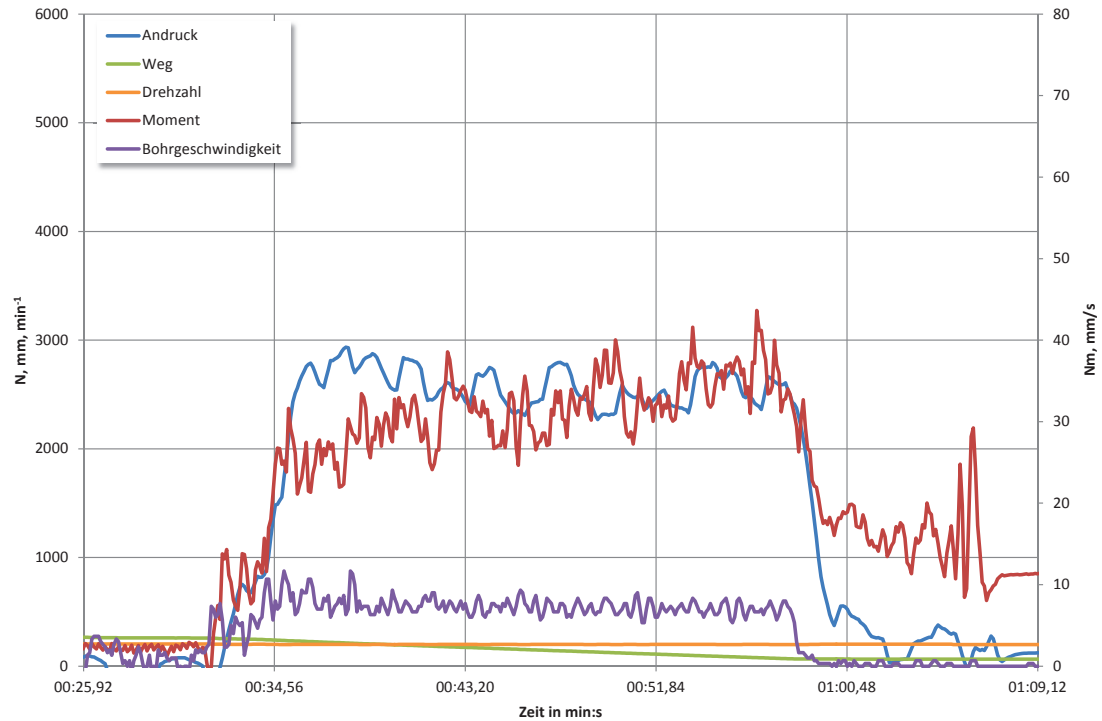


Abb. A.1: Bohrversuch 2011-03-23-13 in Postaer Sandstein

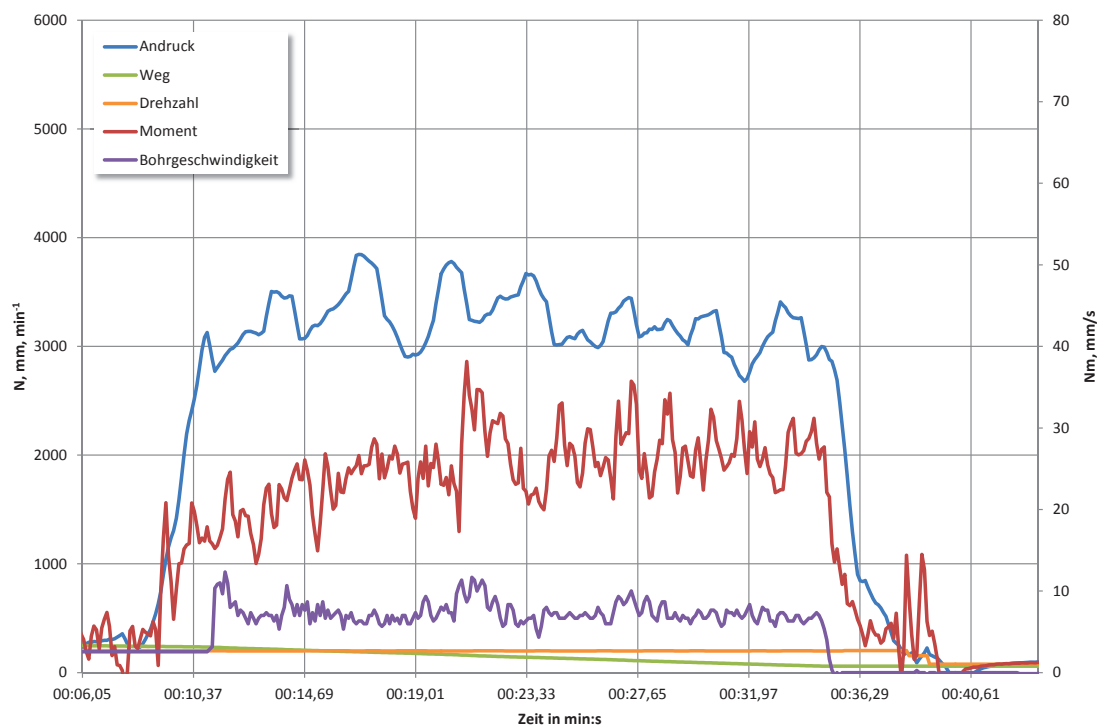


Abb. A.2: Bohrversuch 2011-03-23-14 in Postaer Sandstein

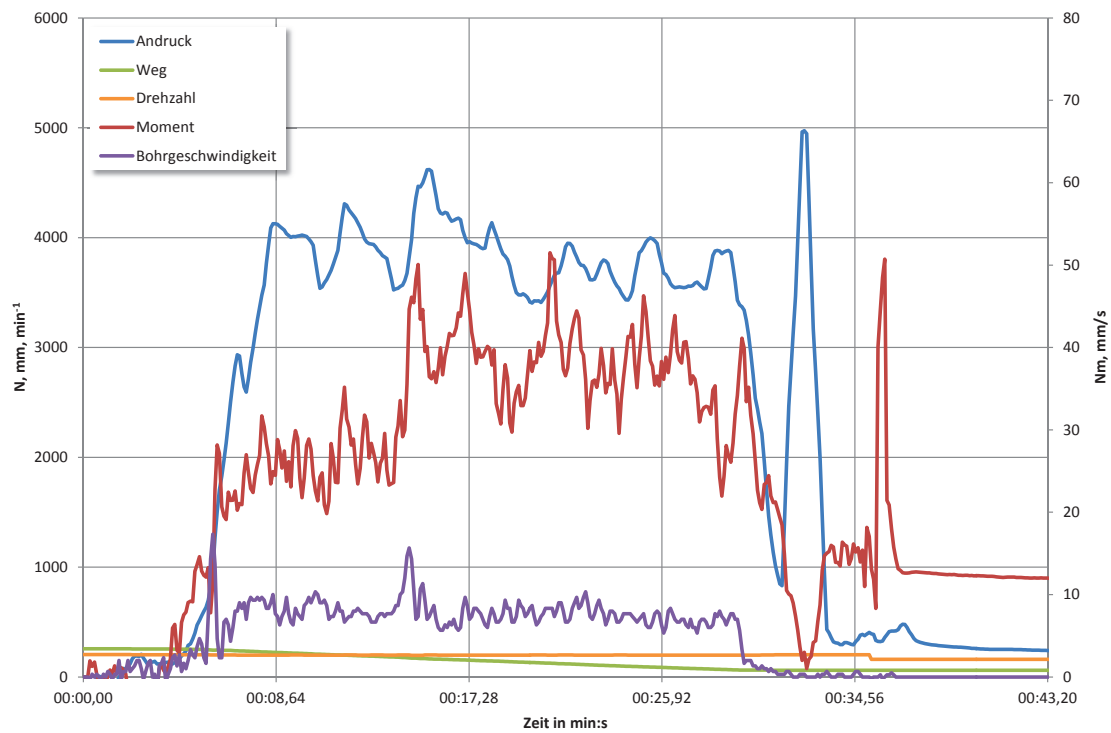


Abb. A.3: Bohrversuch 2011-03-23-15 in Postaer Sandstein

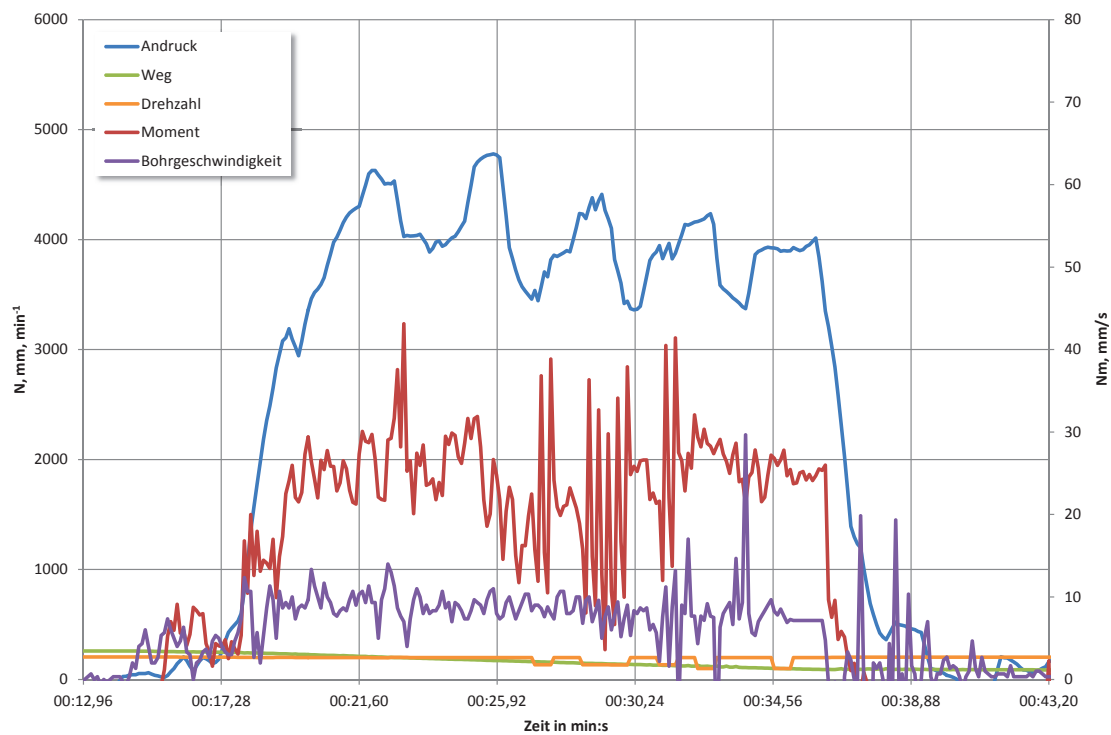


Abb. A.4: Bohrversuch 2011-03-23-16 in Postaer Sandstein

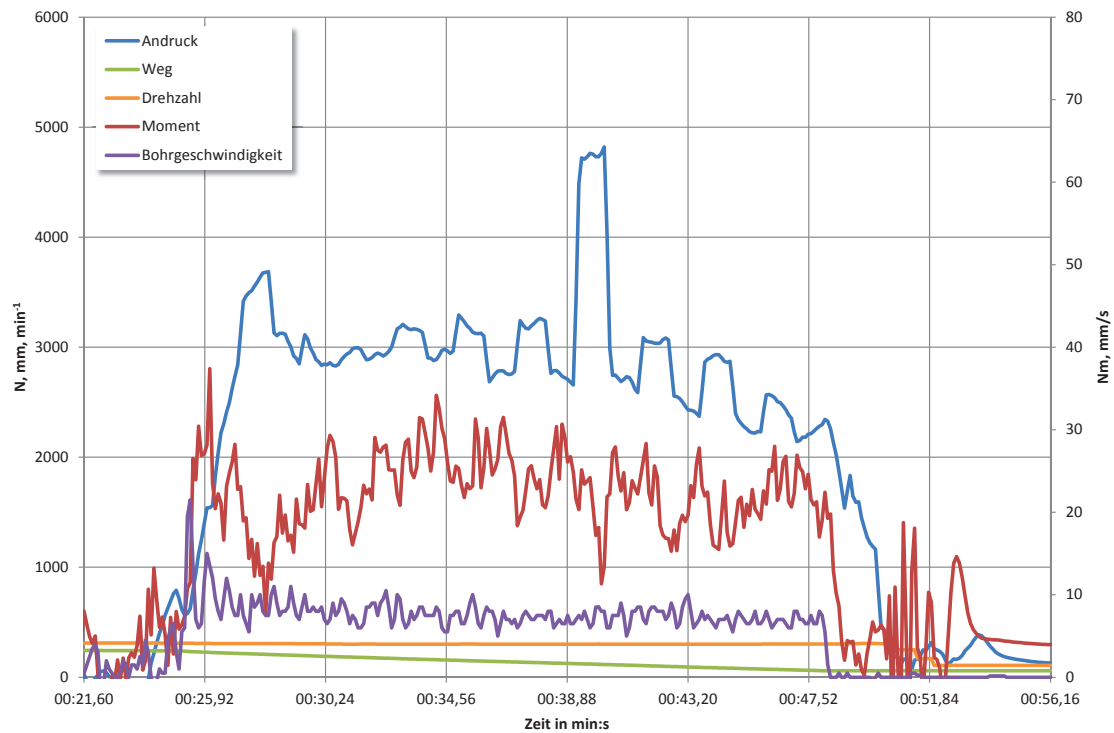


Abb. A.5: Bohrversuch 2011-03-24-17 in Postaer Sandstein

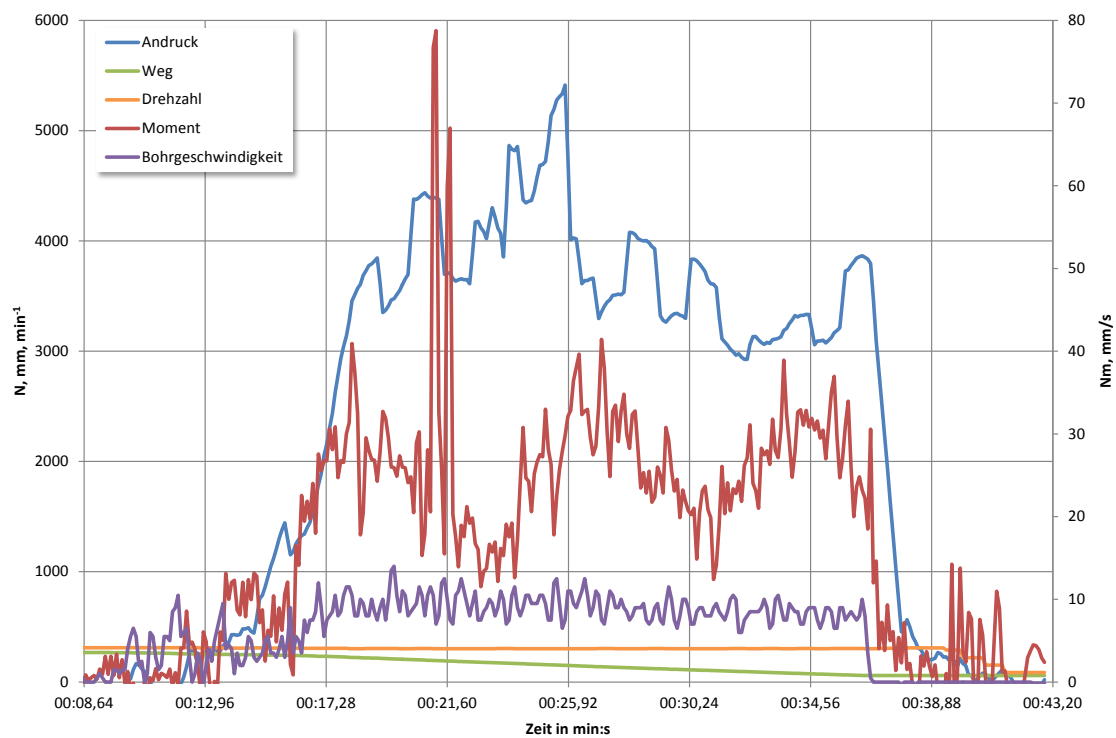


Abb. A.6: Bohrversuch 2011-03-24-18 in Postaer Sandstein

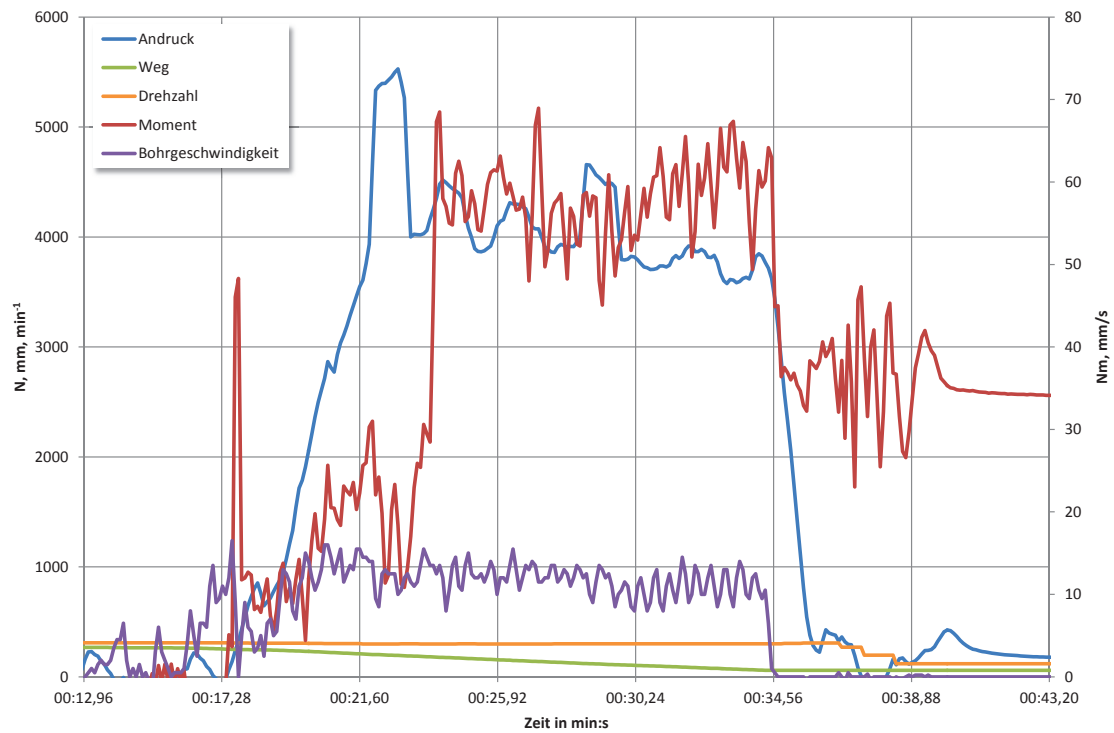


Abb. A.7: Bohrversuch 2011-03-24-19 in Postaer Sandstein

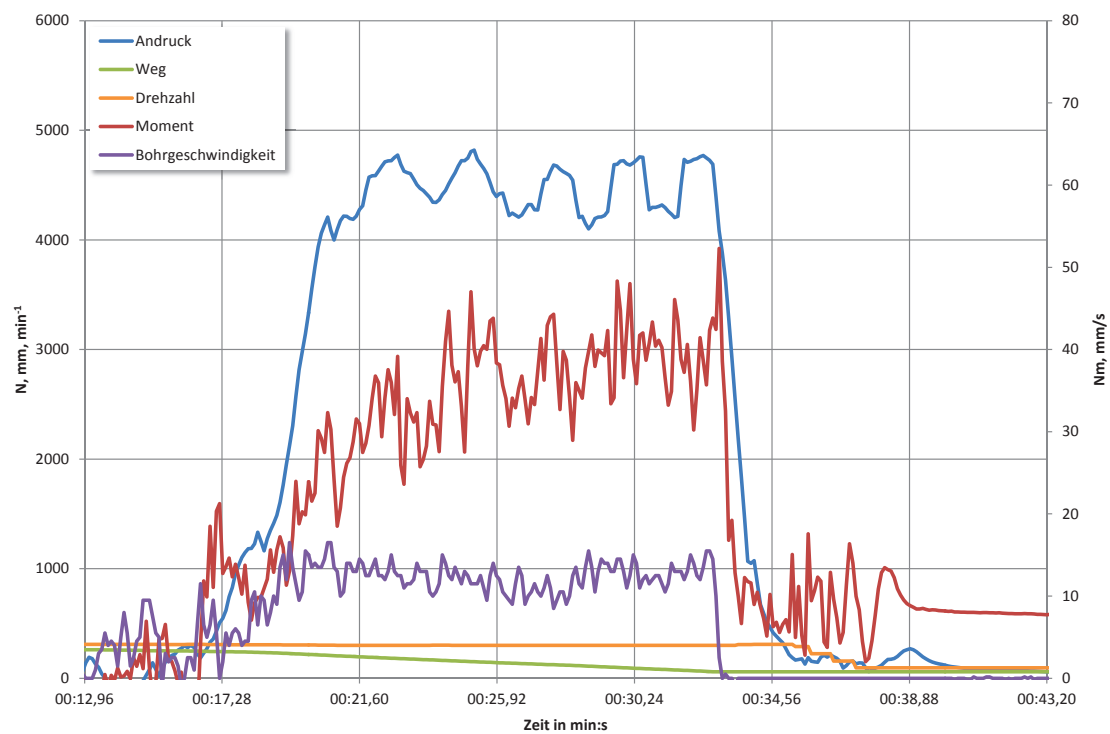


Abb. A.8: Bohrversuch 2011-03-24-20 in Postaer Sandstein

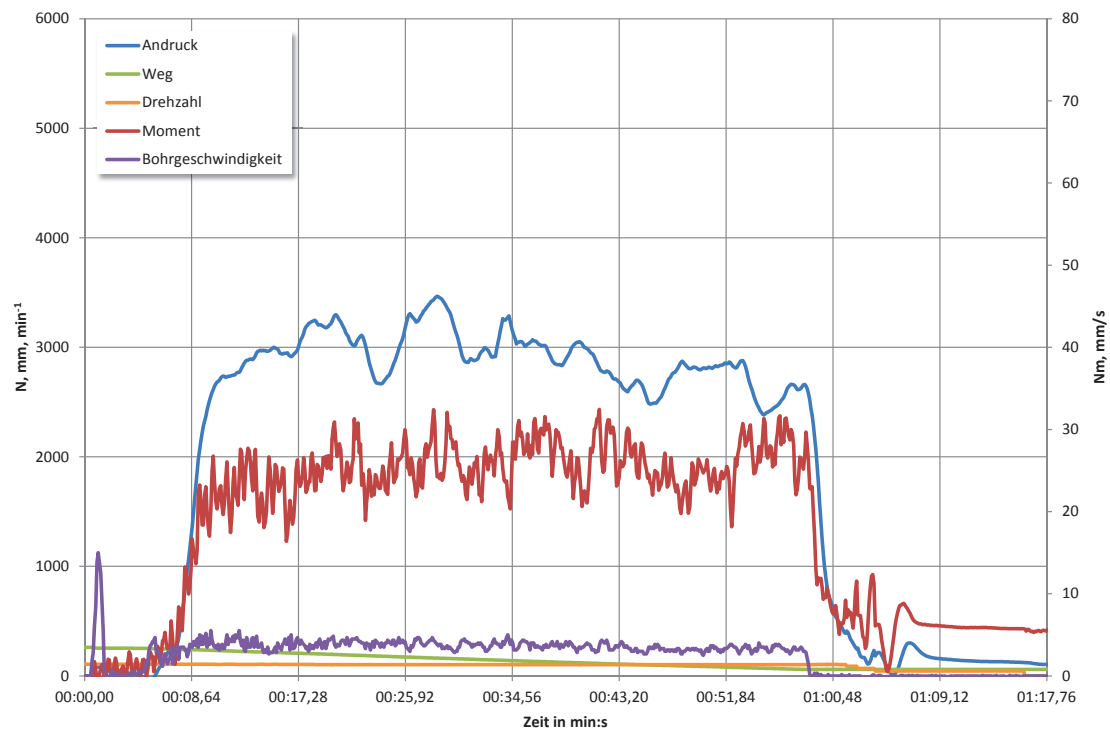


Abb. A.9: Bohrversuch 2011-03-25-21 in Postaer Sandstein

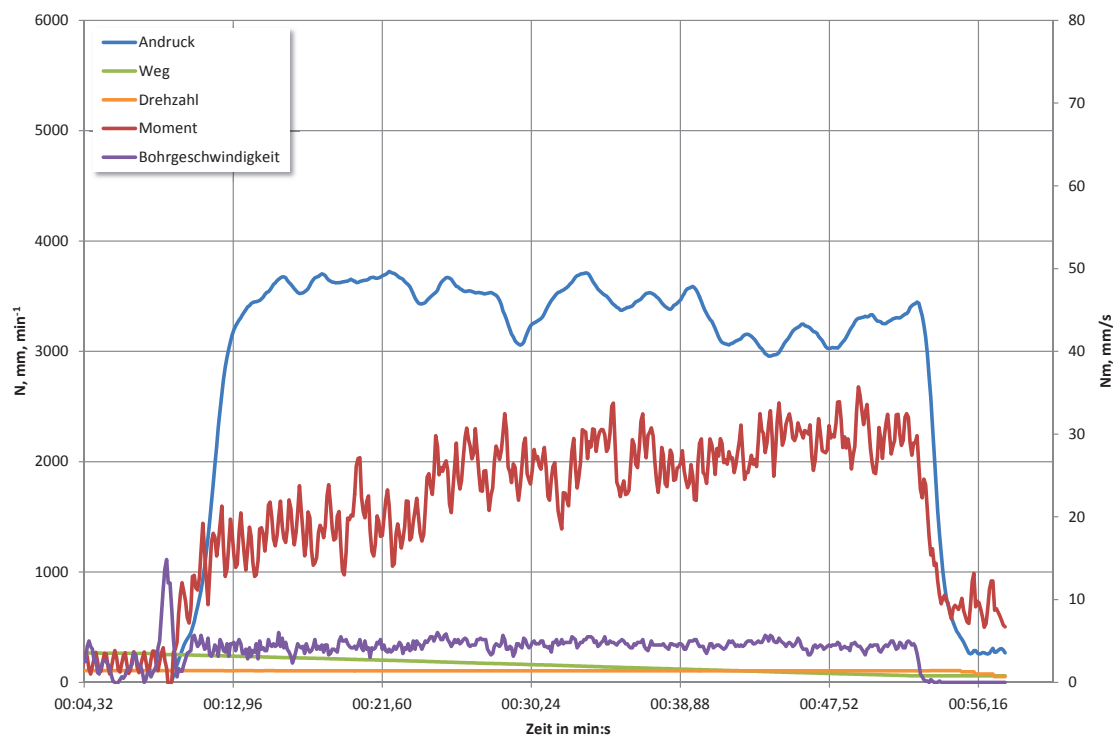


Abb. A.10: Bohrversuch 2011-03-25-22 in Postaer Sandstein

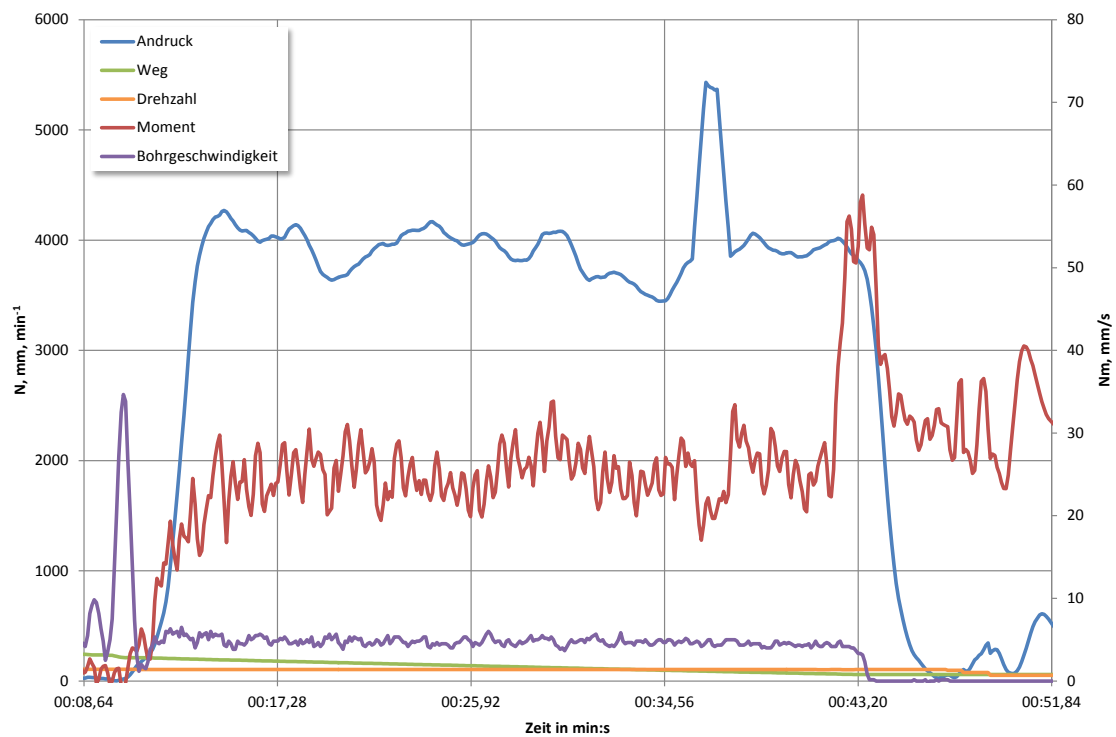


Abb. A.11: Bohrversuch 2011-03-25-23 in Postaer Sandstein

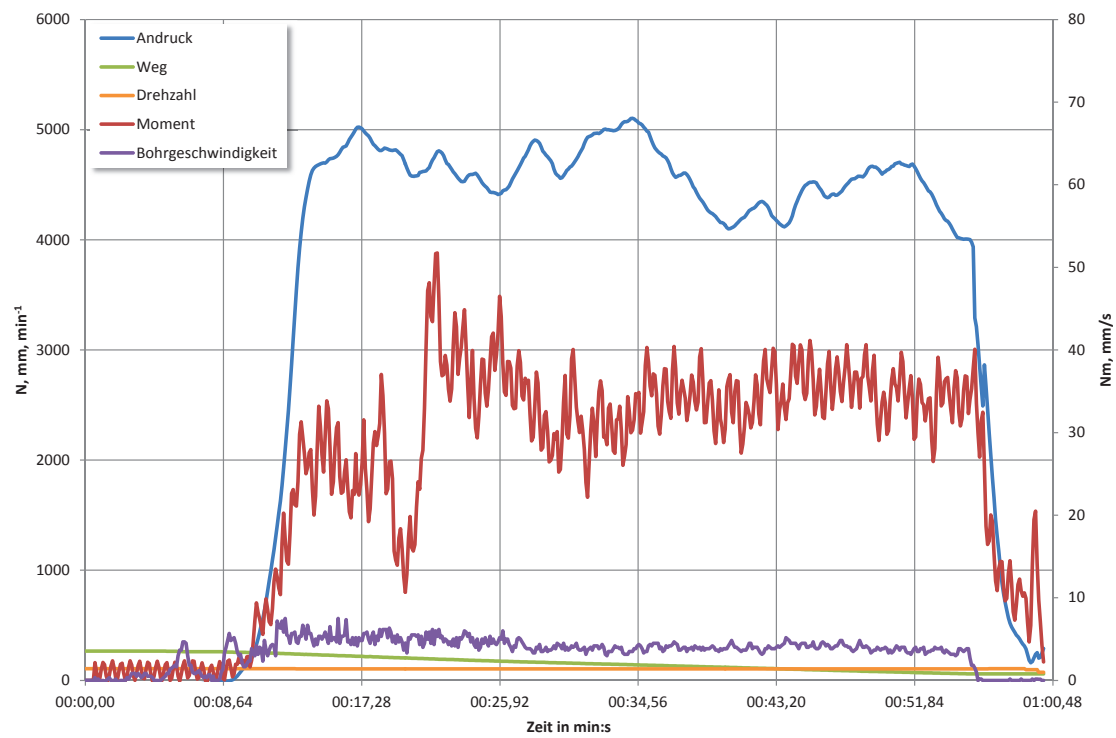


Abb. A.12: Bohrversuch 2011-03-25-24 in Postaer Sandstein

A.2 Bohrverlaufsdigramme Schiefer

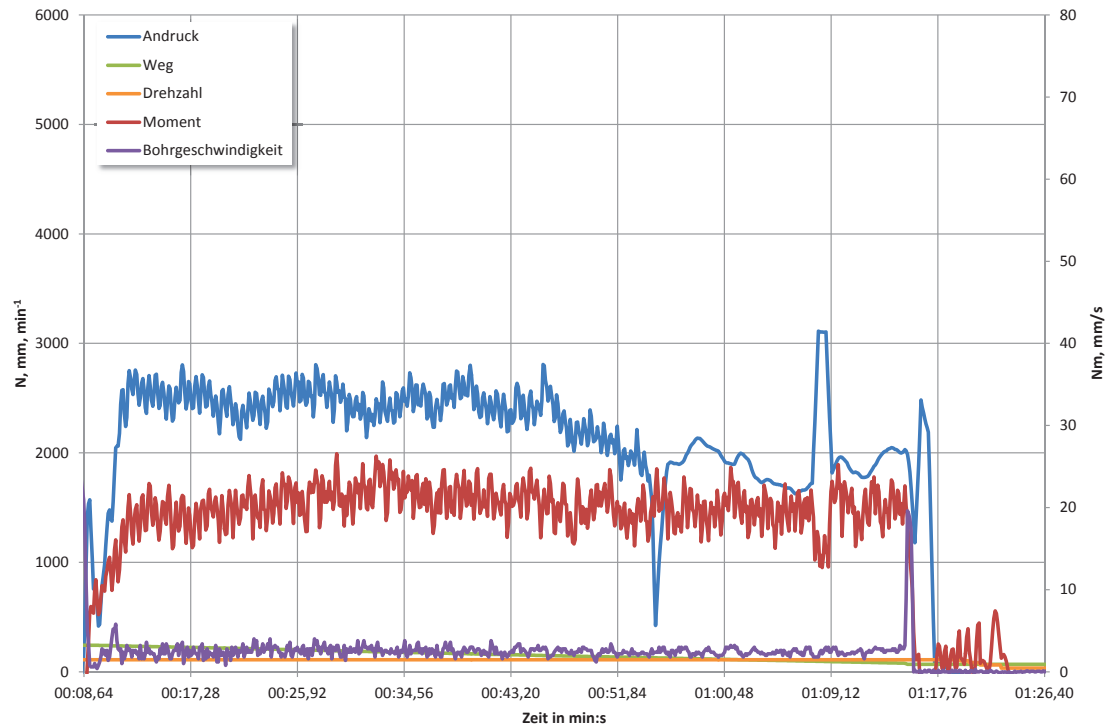


Abb. A.13: Bohrversuch 2011-03-30-37 in Schiefer



Abb. A.14: Bohrversuch 2011-03-30-38 in Schiefer

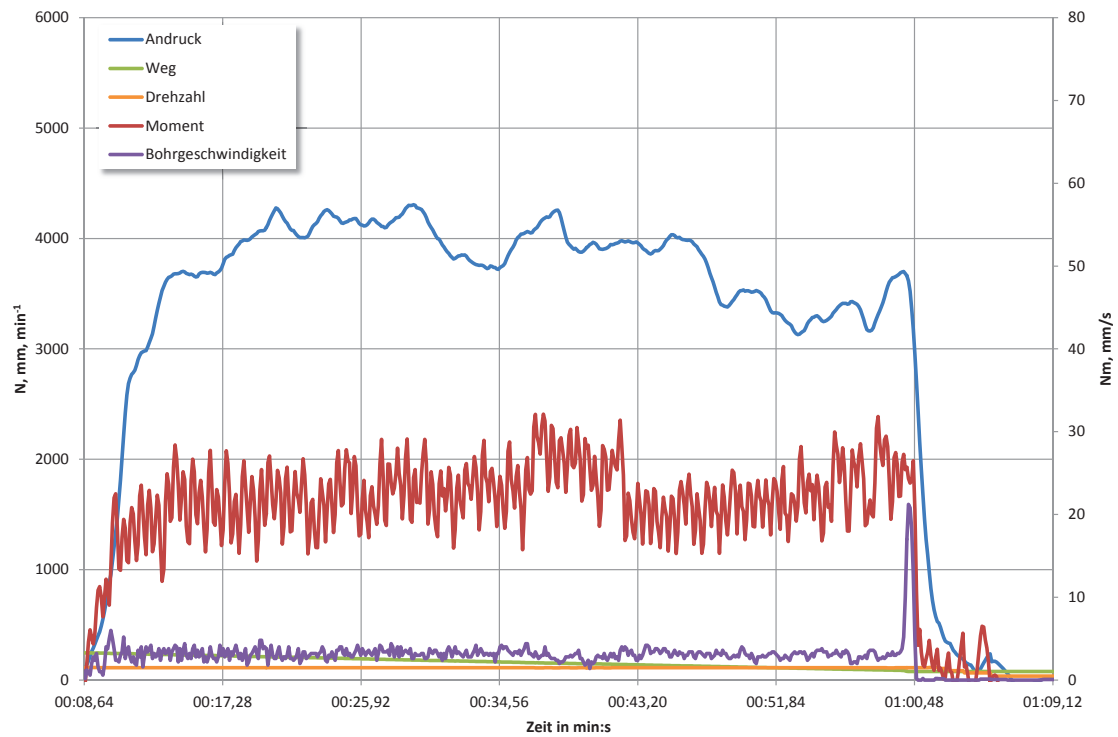


Abb. A.15: Bohrversuch 2011-03-30-39 in Schiefer

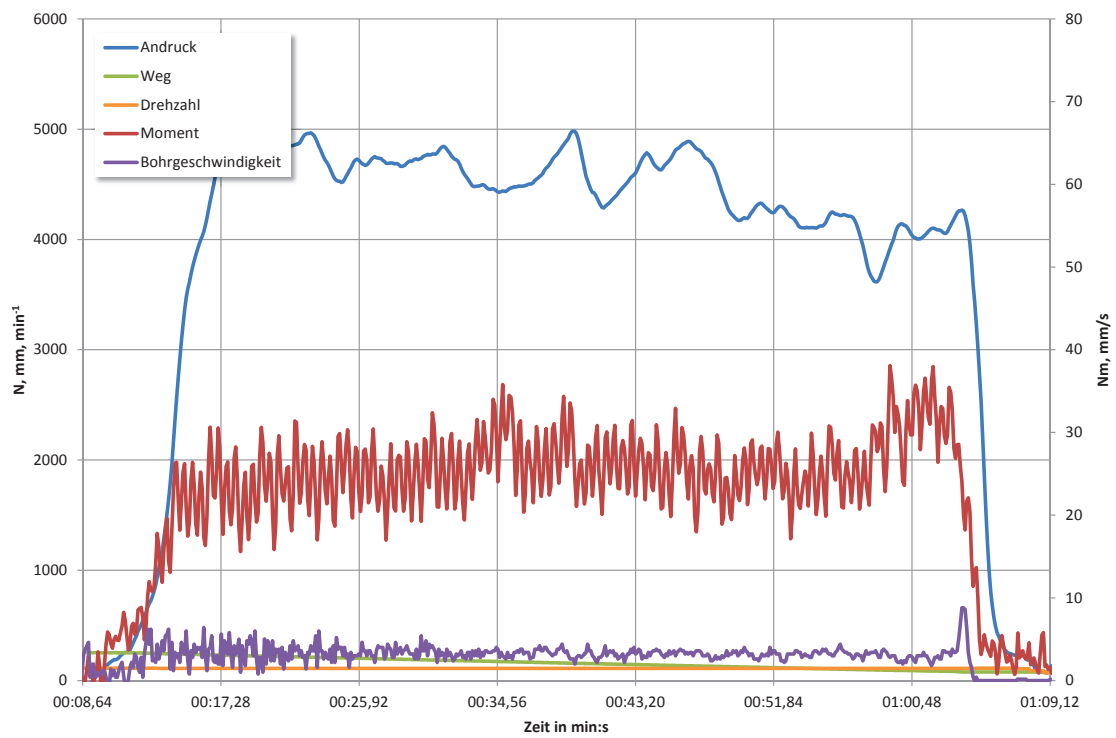


Abb. A.16: Bohrversuch 2011-03-30-40 in Schiefer

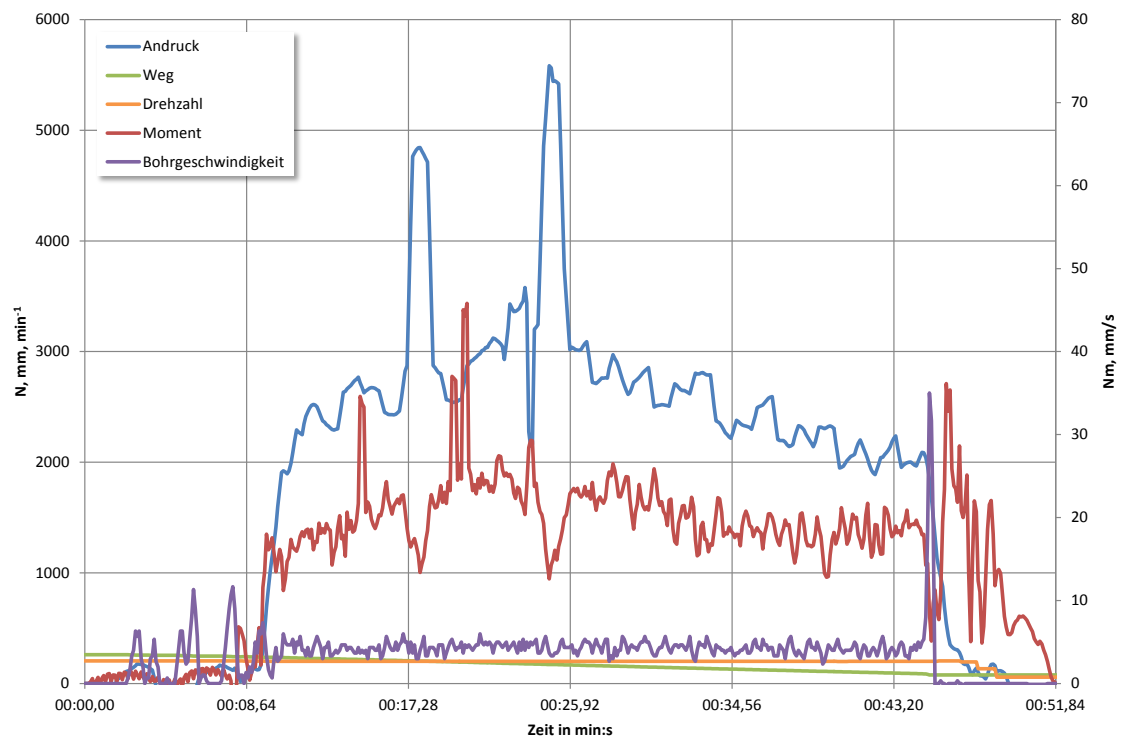


Abb. A.17: Bohrversuch 2011-03-30-41 in Schiefer

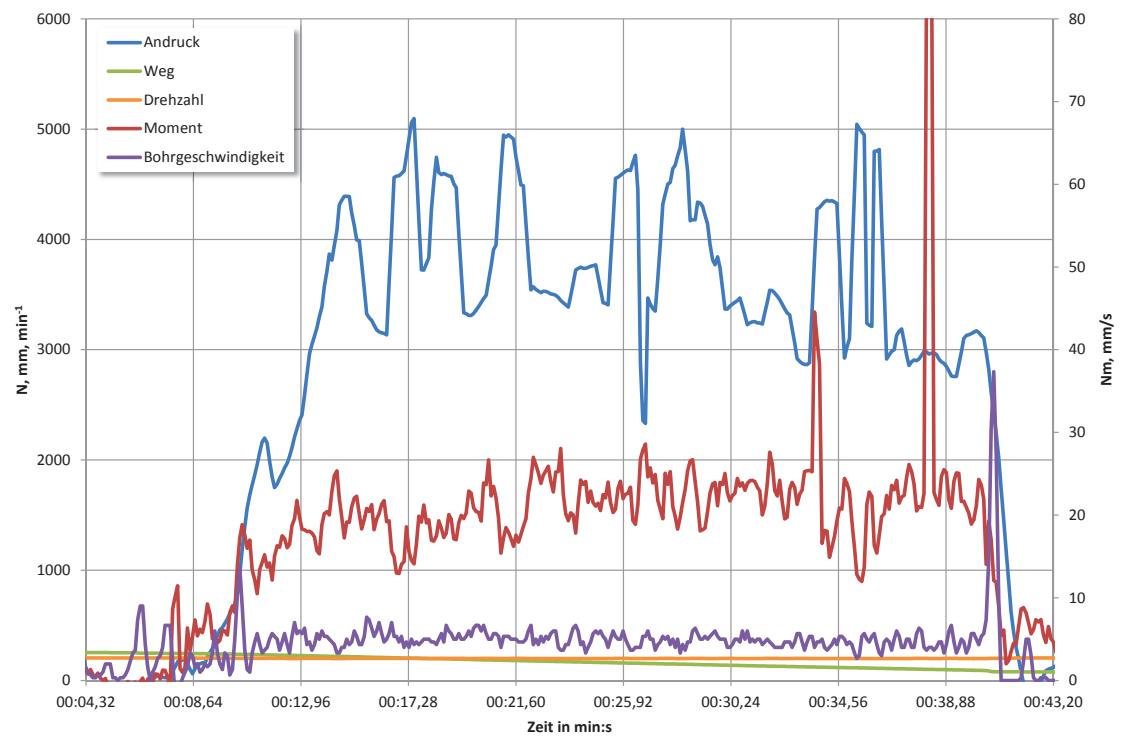


Abb. A.18: Bohrversuch 2011-03-30-42 in Schiefer

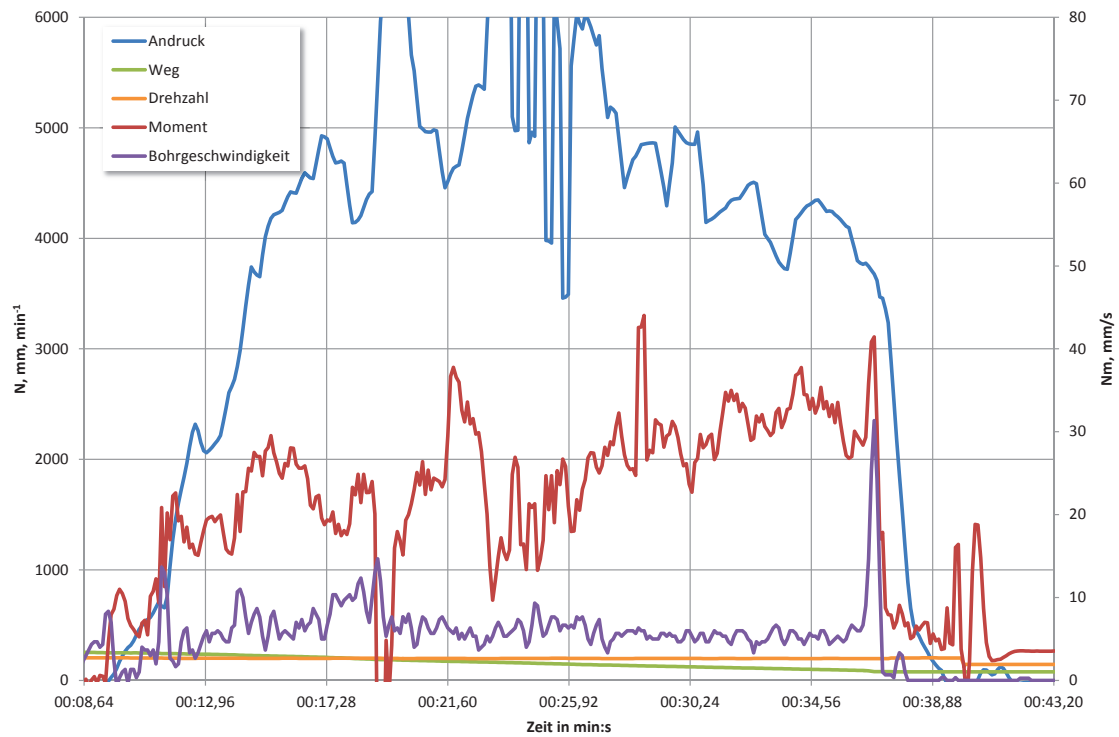


Abb. A.19: Bohrversuch 2011-03-30-44 in Schiefer

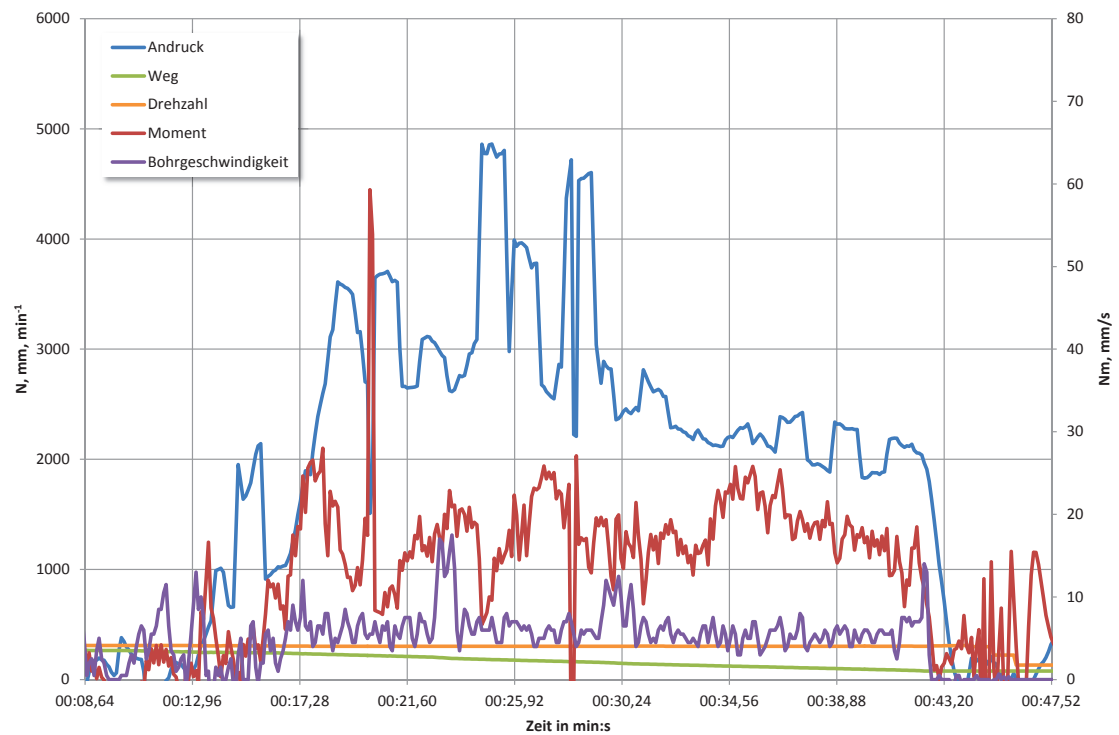


Abb. A.20: Bohrversuch 2011-03-30-45 in Schiefer

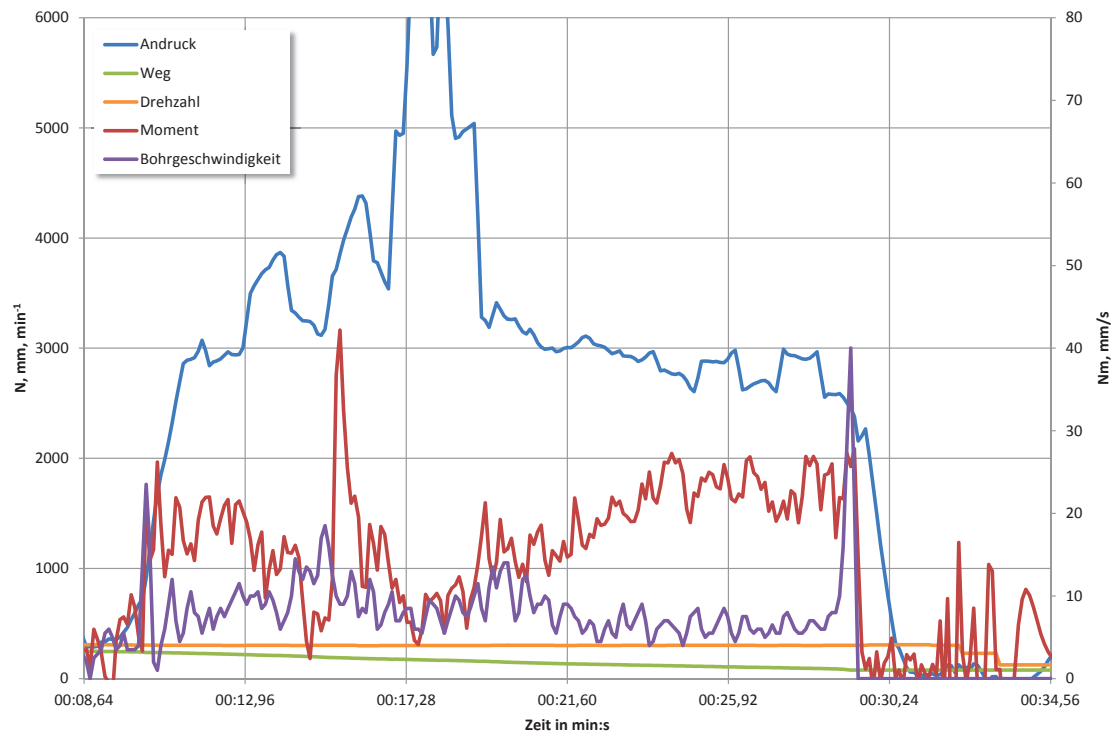


Abb. A.21: Bohrversuch 2011-03-30-46 in Schiefer

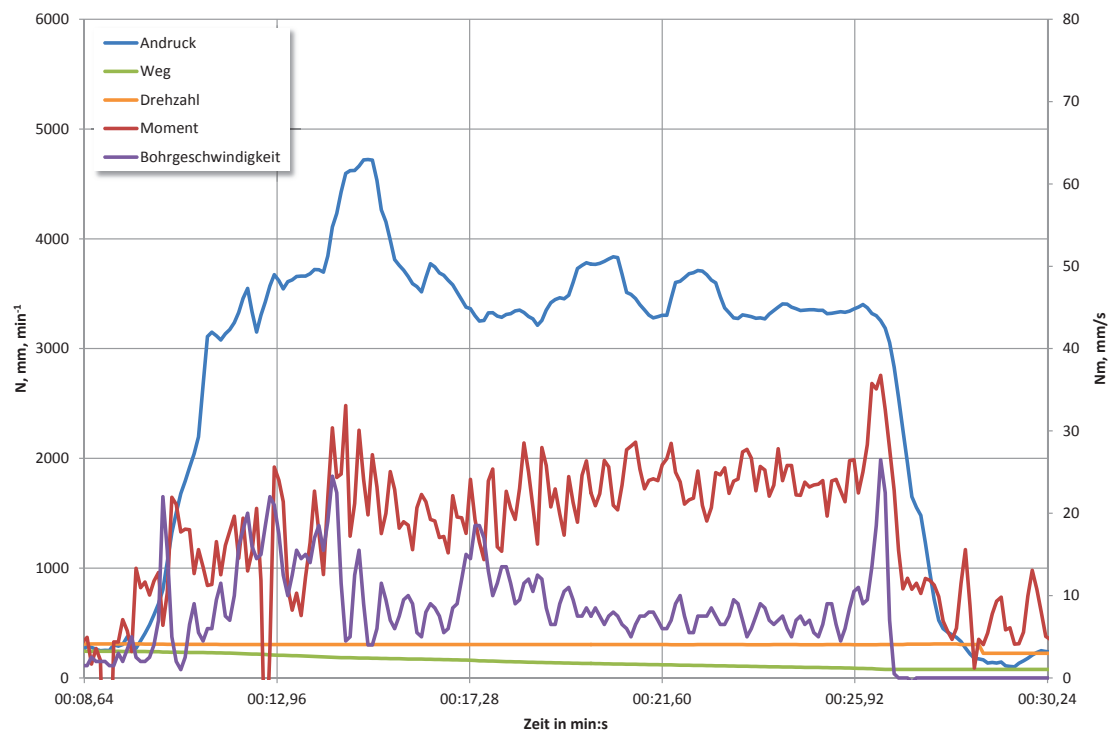


Abb. A.22: Bohrversuch 2011-03-30-47 in Schiefer

A.3 Bohrverlaufsdigramme Kalzitmarmor

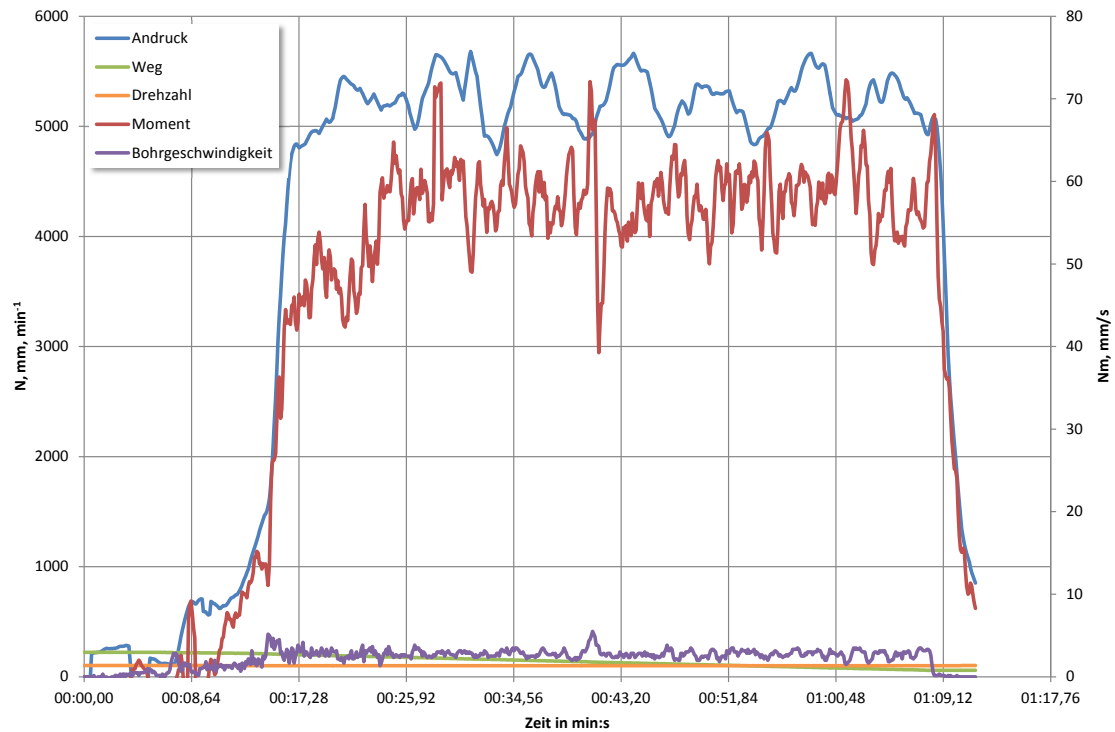


Abb. A.23: Bohrversuch 2011-03-16-03 in Kalzitmarmor



Abb. A.24: Bohrversuch 2011-03-16-04 in Kalzitmarmor

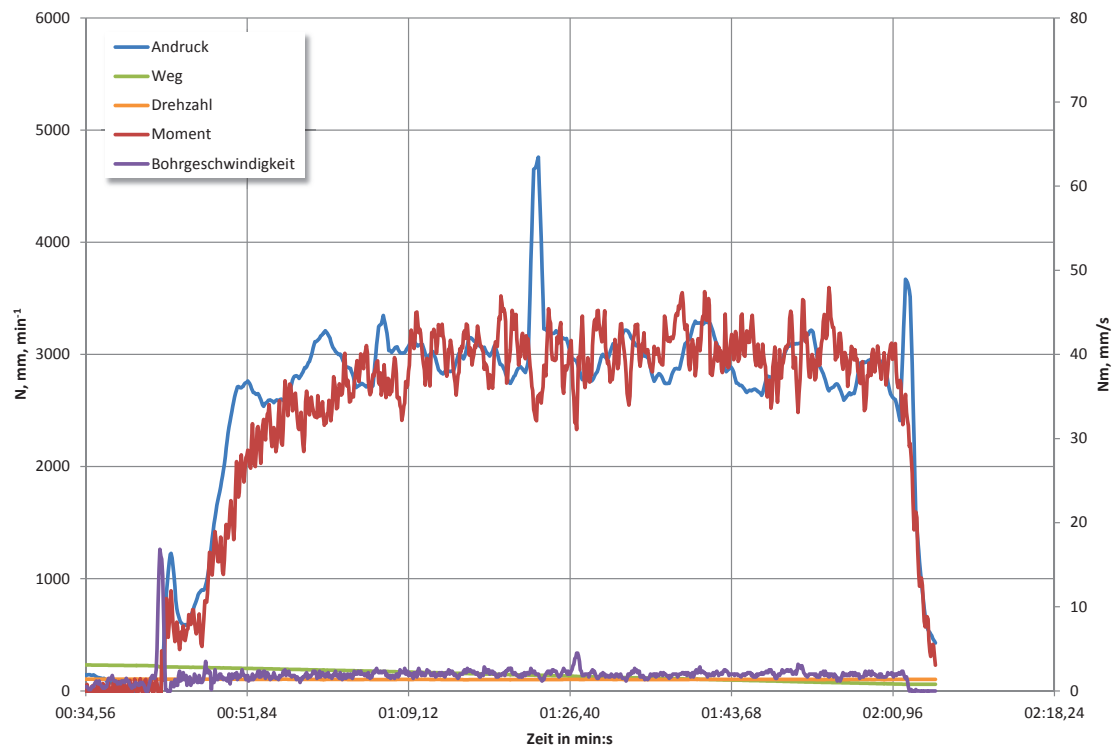


Abb. A.25: Bohrversuch 2011-03-16-05 in Kalzitmarmor

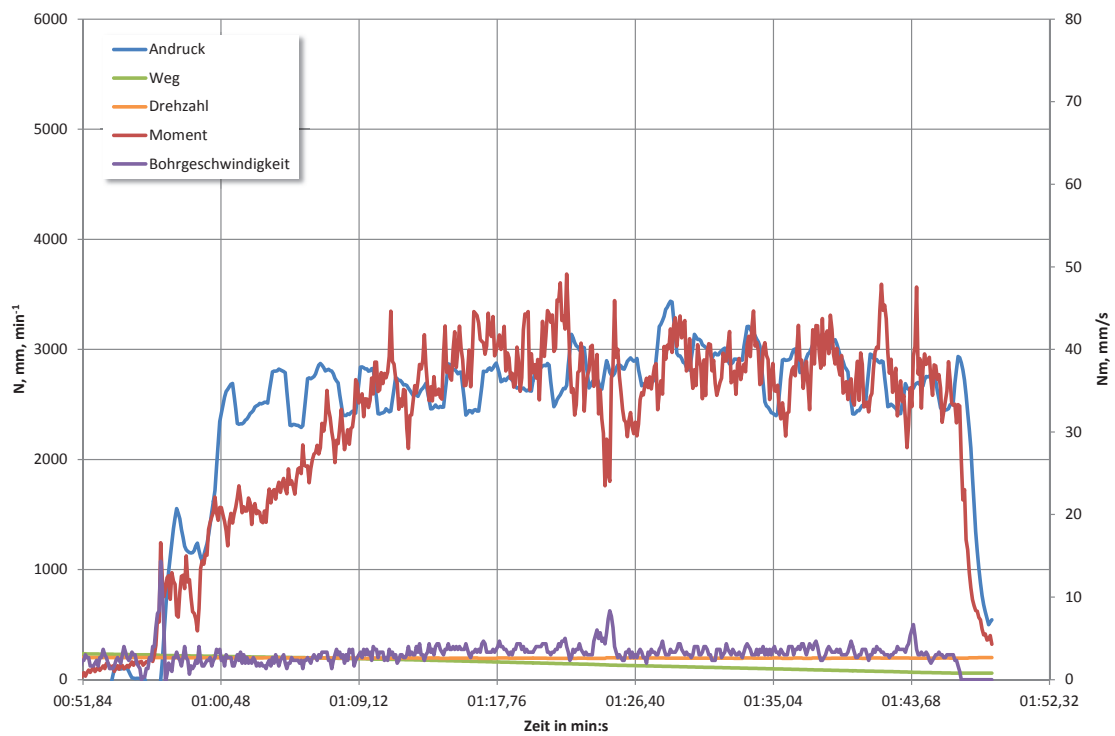


Abb. A.26: Bohrversuch 2011-03-16-06 in Kalzitmarmor

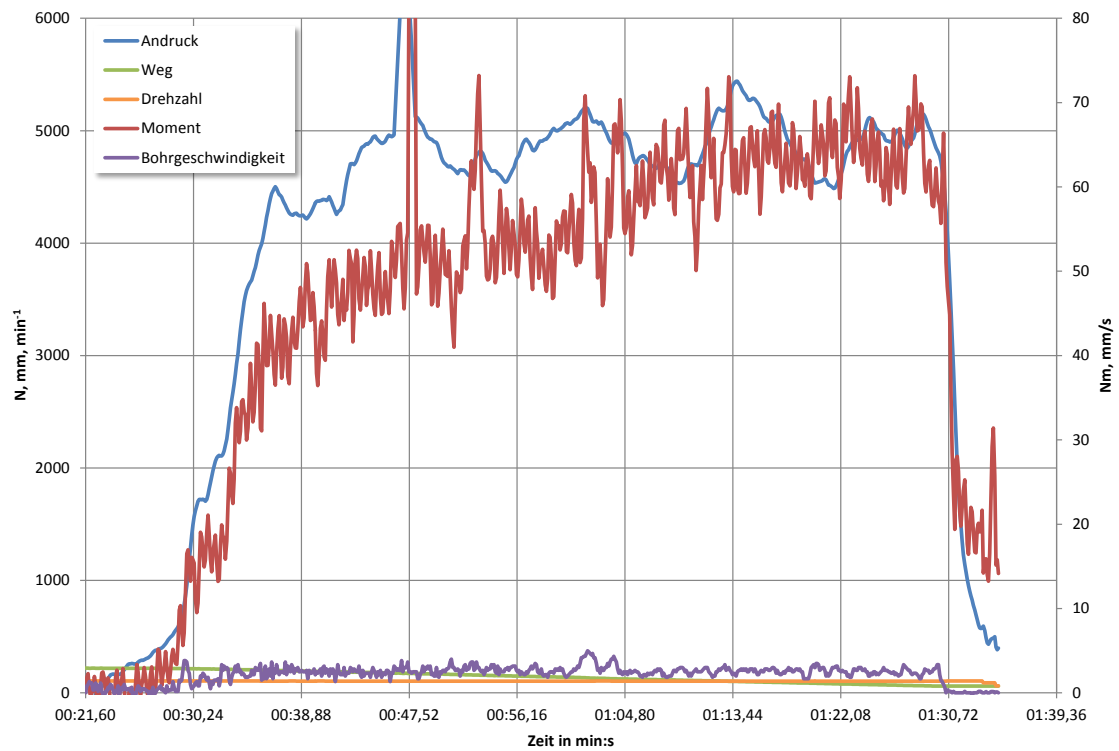


Abb. A.27: Bohrversuch 2011-03-16-07 in Kalzitmarmor

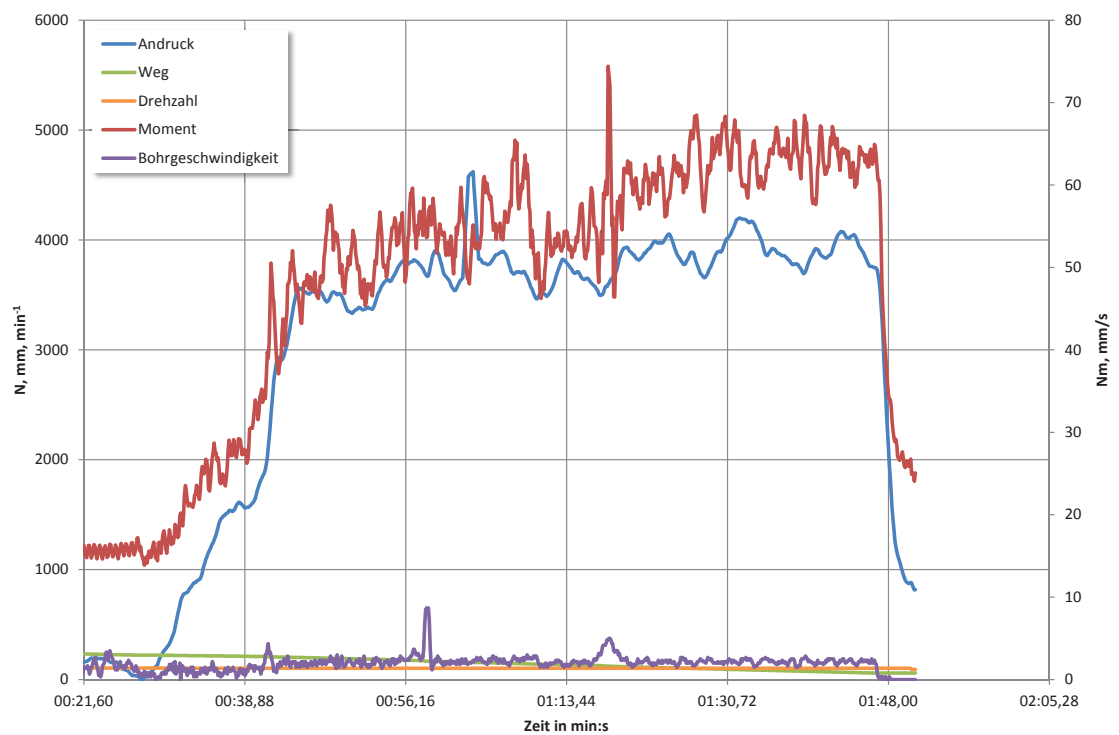


Abb. A.28: Bohrversuch 2011-03-16-08 in Kalzitmarmor

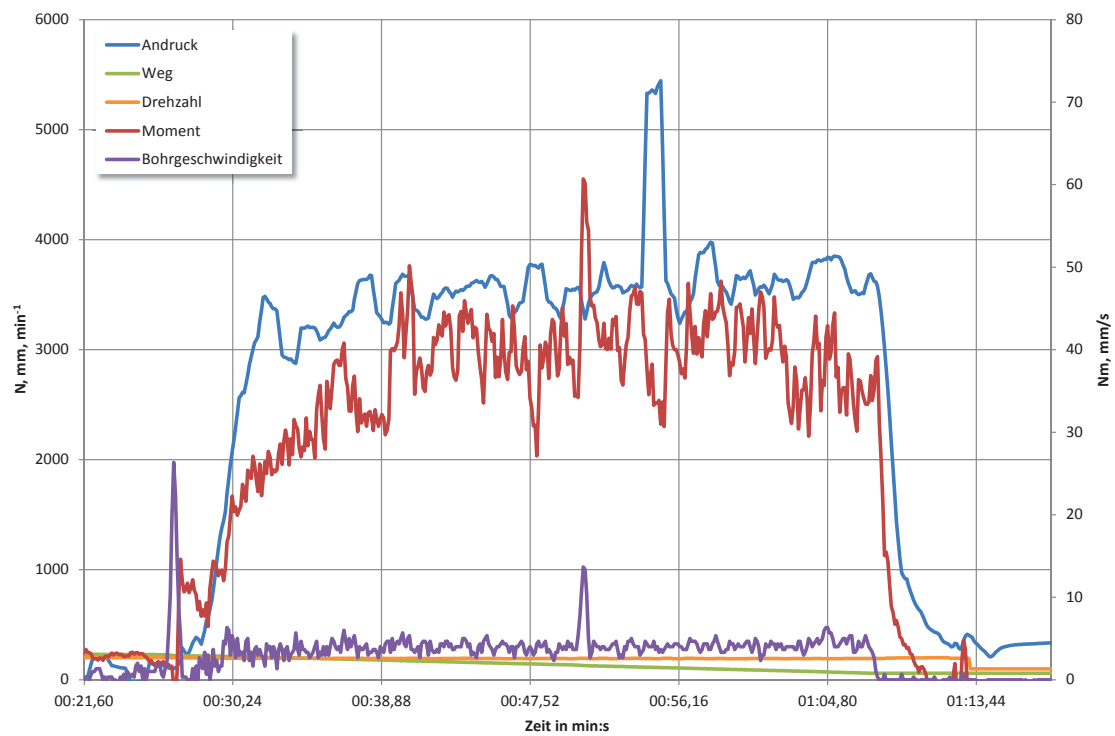


Abb. A.29: Bohrversuch 2011-03-17-09 in Kalzitmarmor

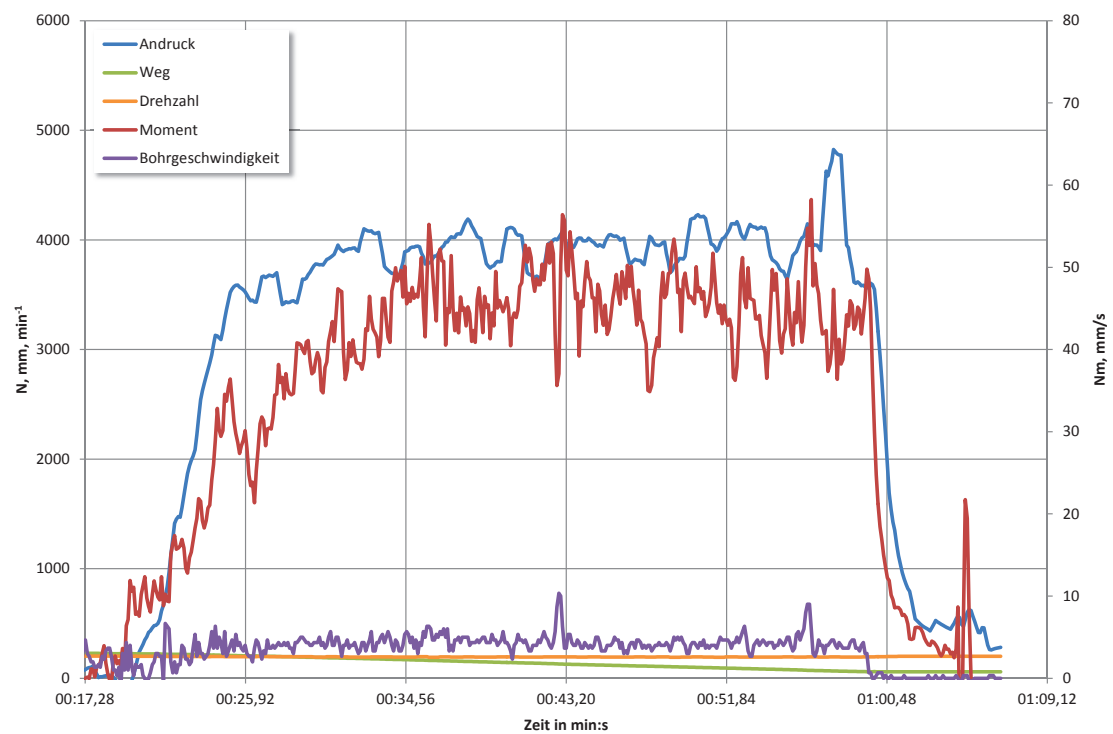


Abb. A.30: Bohrversuch 2011-03-17-10 in Kalzitmarmor

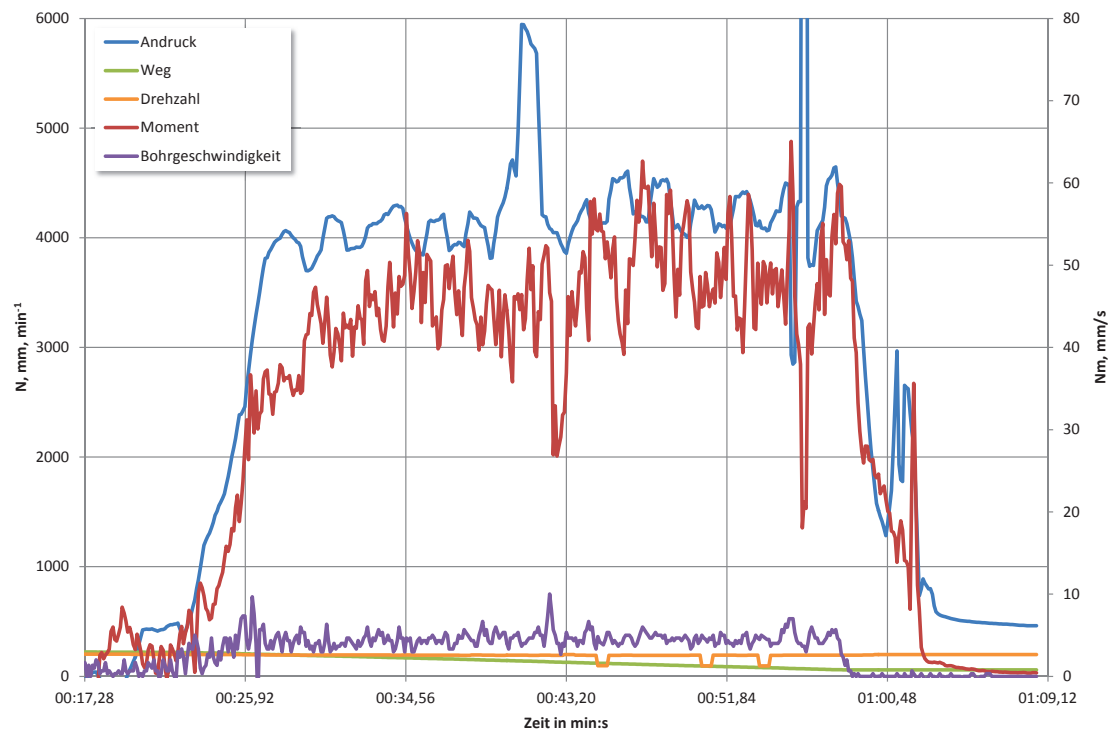


Abb. A.31: Bohrversuch 2011-03-17-11 in Kalzitmarmor

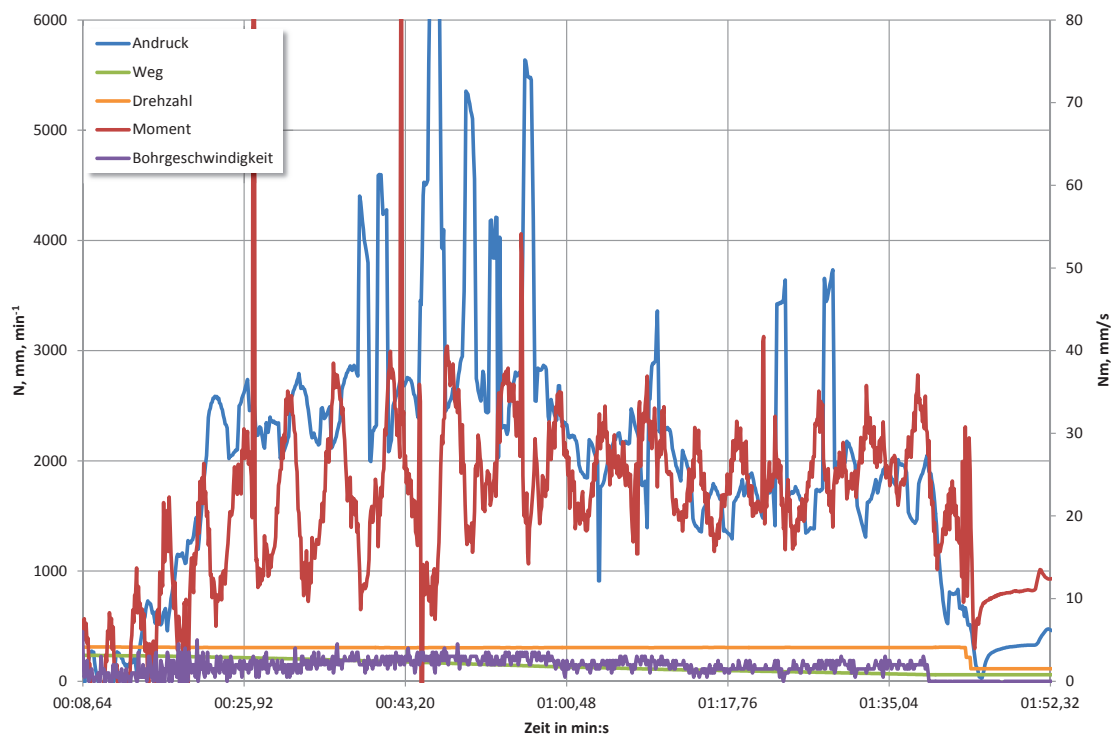


Abb. A.32: Bohrversuch 2011-03-28-29 in Kalzitmarmor

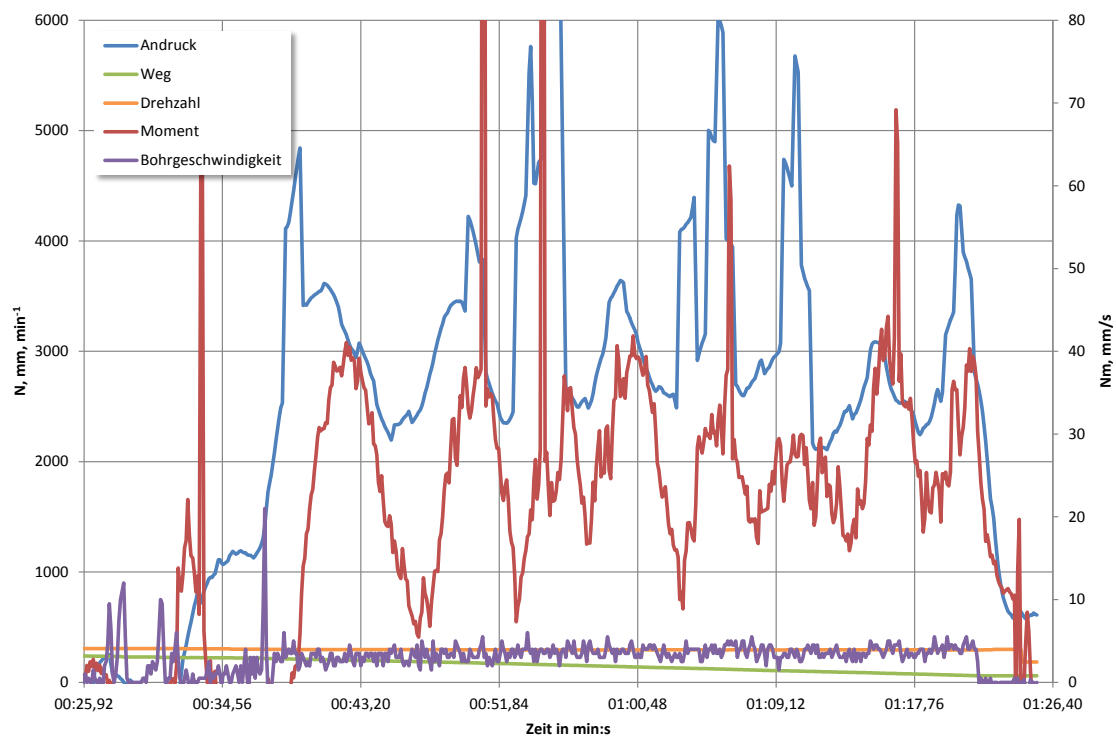


Abb. A.33: Bohrversuch 2011-03-28-30 in Kalzitmarmor

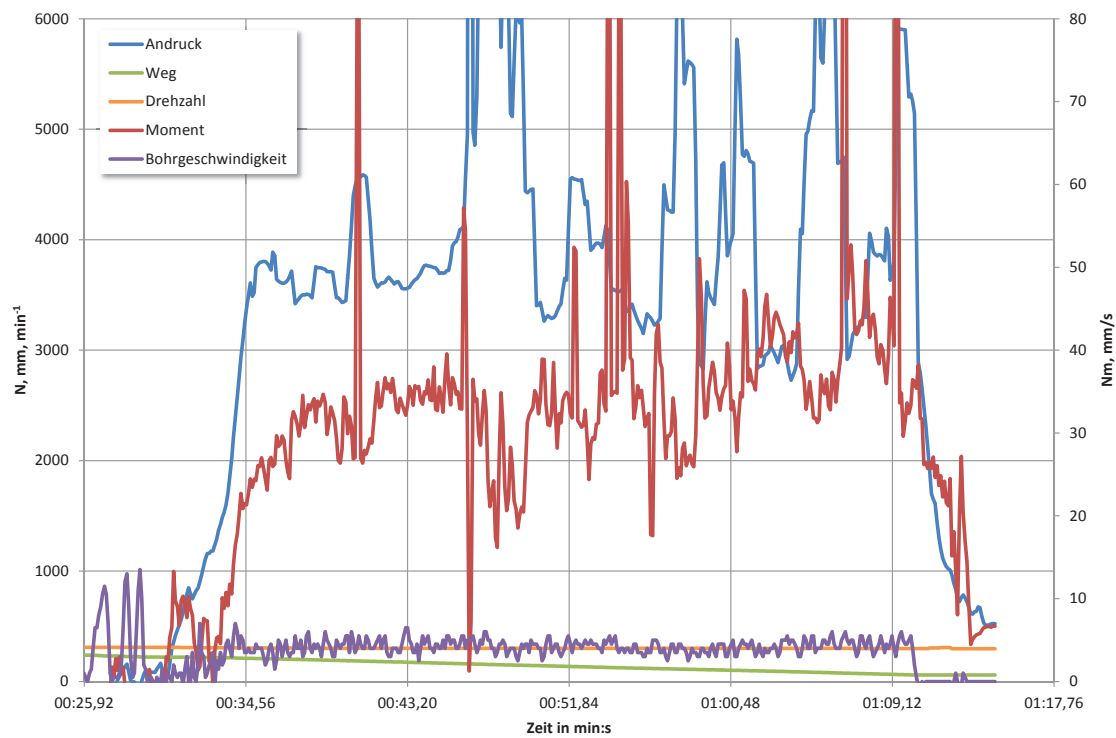


Abb. A.34: Bohrversuch 2011-03-28-31 in Kalzitmarmor

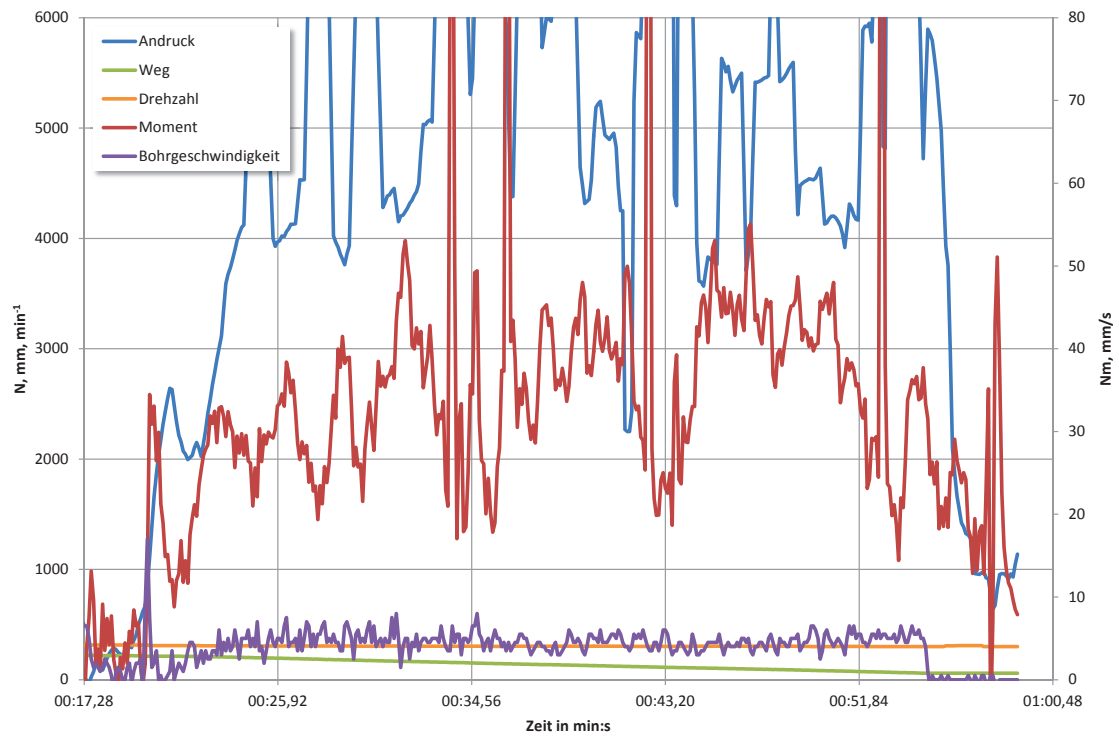


Abb. A.35: Bohrversuch 2011-03-28-32 in Kalzitmarmor

A.4 Bohrverlaufsdigramme Freiburger Gneis

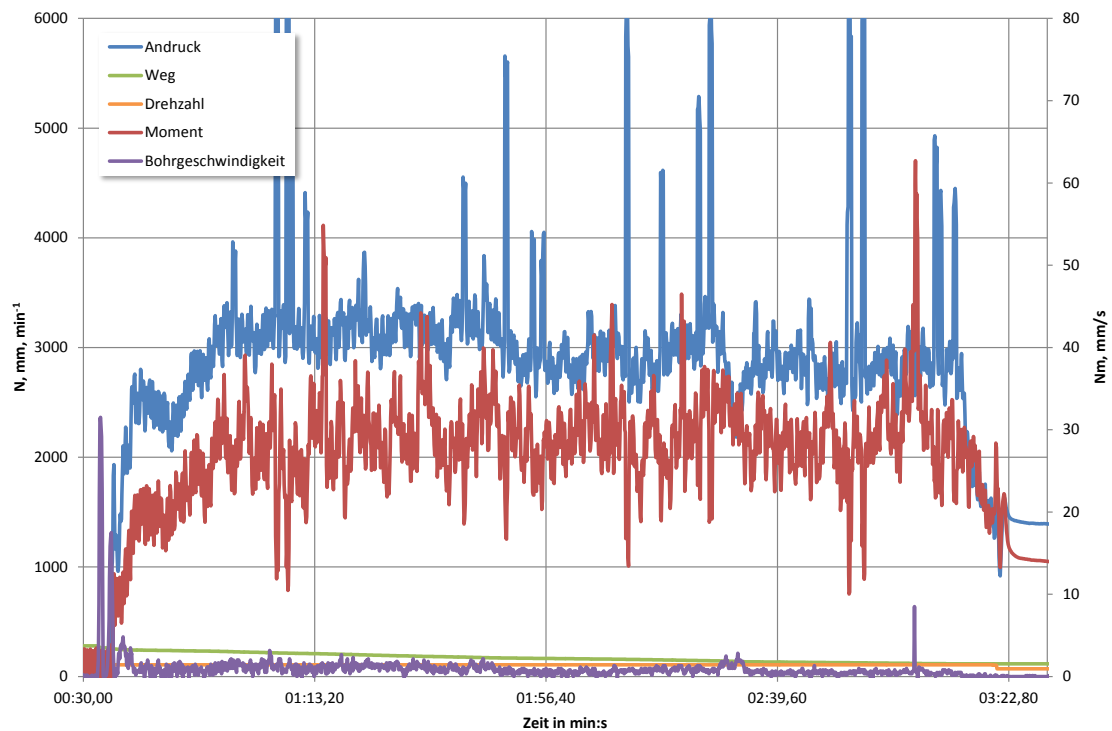


Abb. A.36: Bohrversuch 2011-06-21-02 in Freiburger Gneis

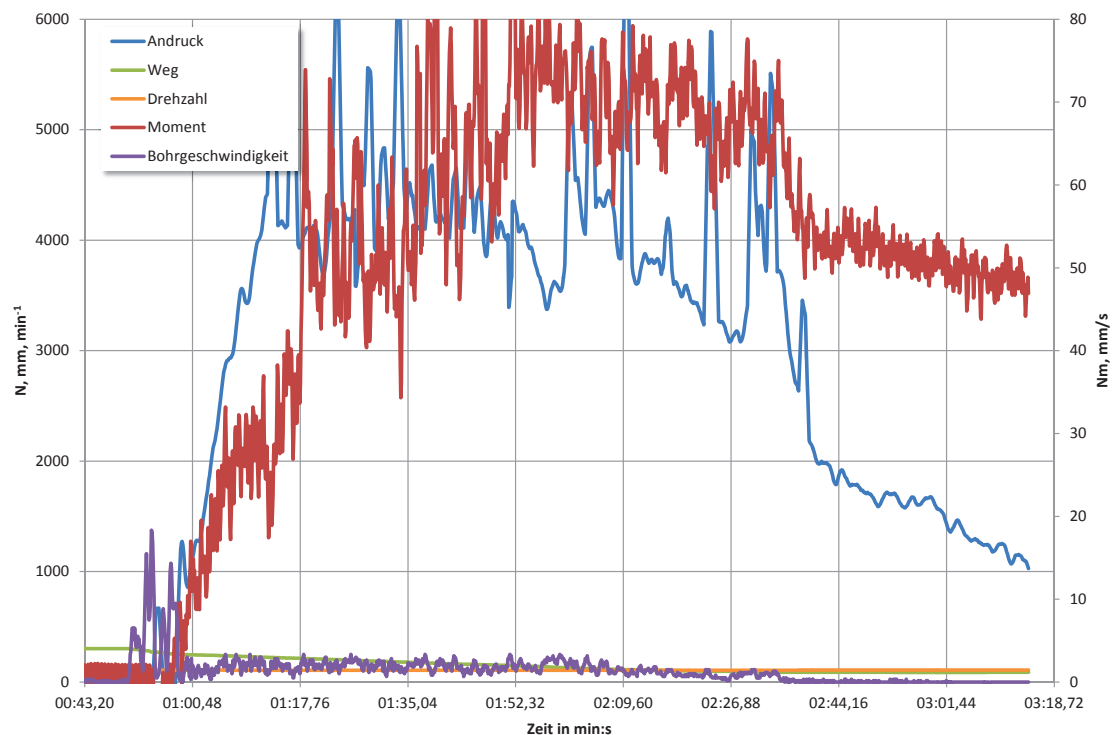


Abb. A.37: Bohrversuch 2011-07-11-03 in Freiburger Gneis

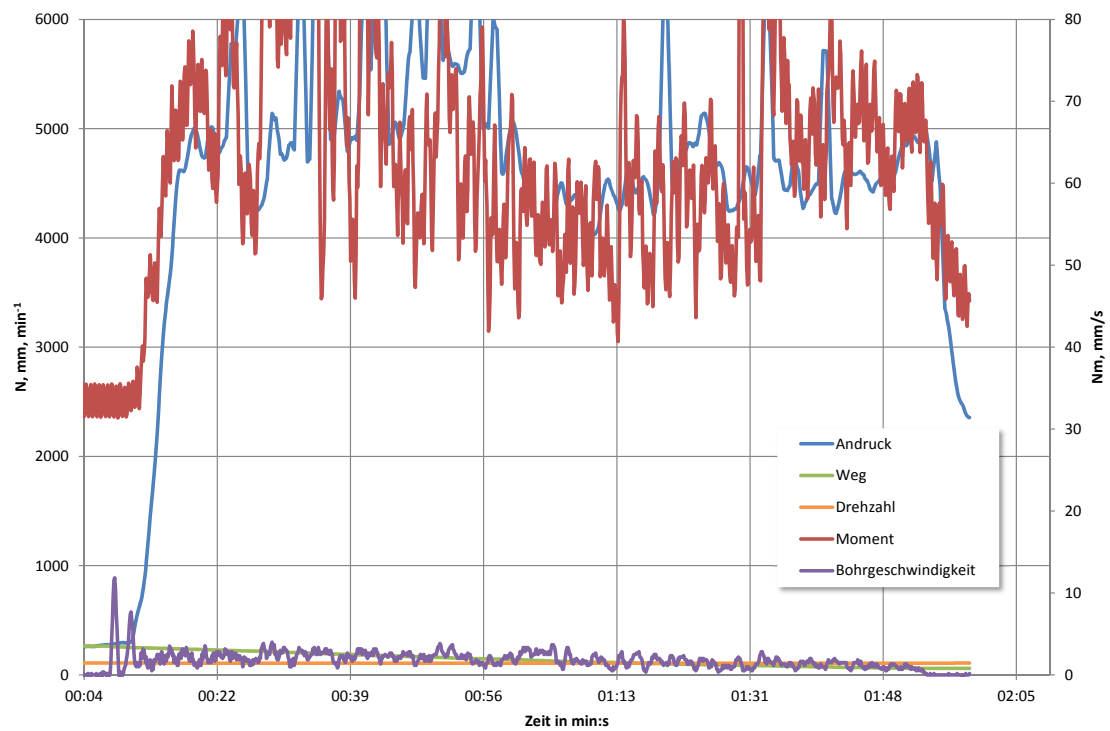


Abb. A.38: Bohrversuch 2011-07-11-04 in Freiberg Gneiss

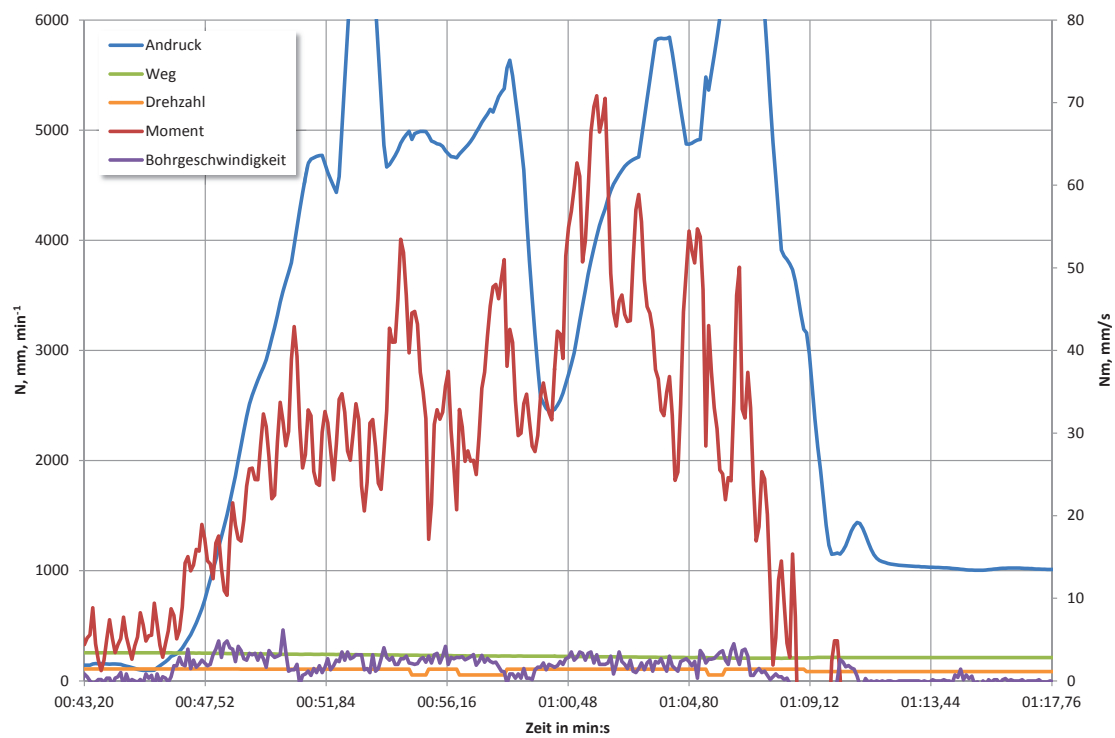


Abb. A.39: Bohrversuch 2011-07-11-05 in Freiberg Gneiss

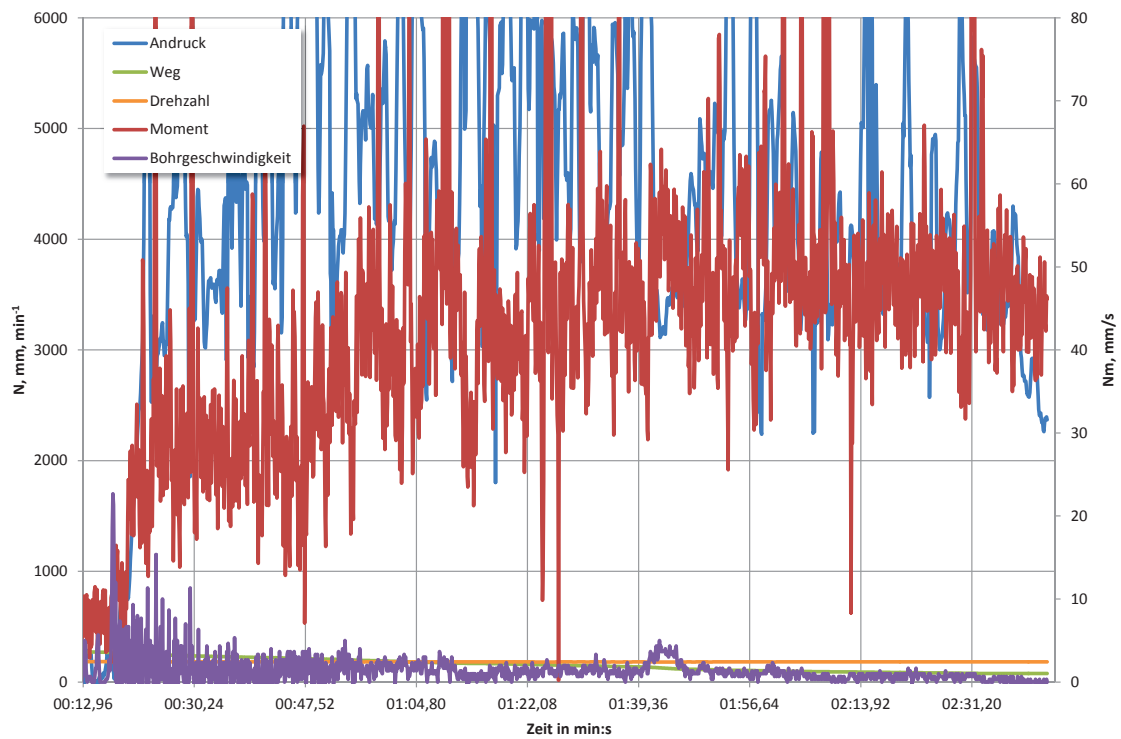


Abb. A.40: Bohrversuch 2011-07-11-06 in Freiberg Gneiss

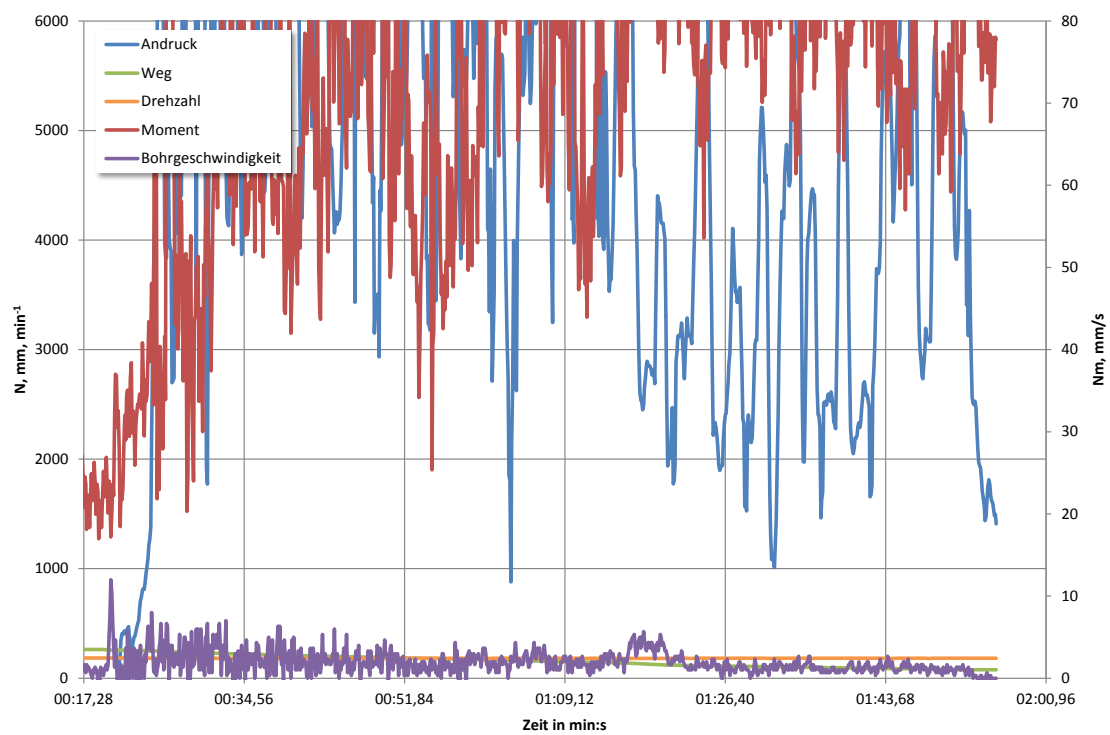


Abb. A.41: Bohrversuch 2011-07-11-08 in Freiberg Gneiss

A.5 Bohrverlaufsdigramme Lausitzer Granit

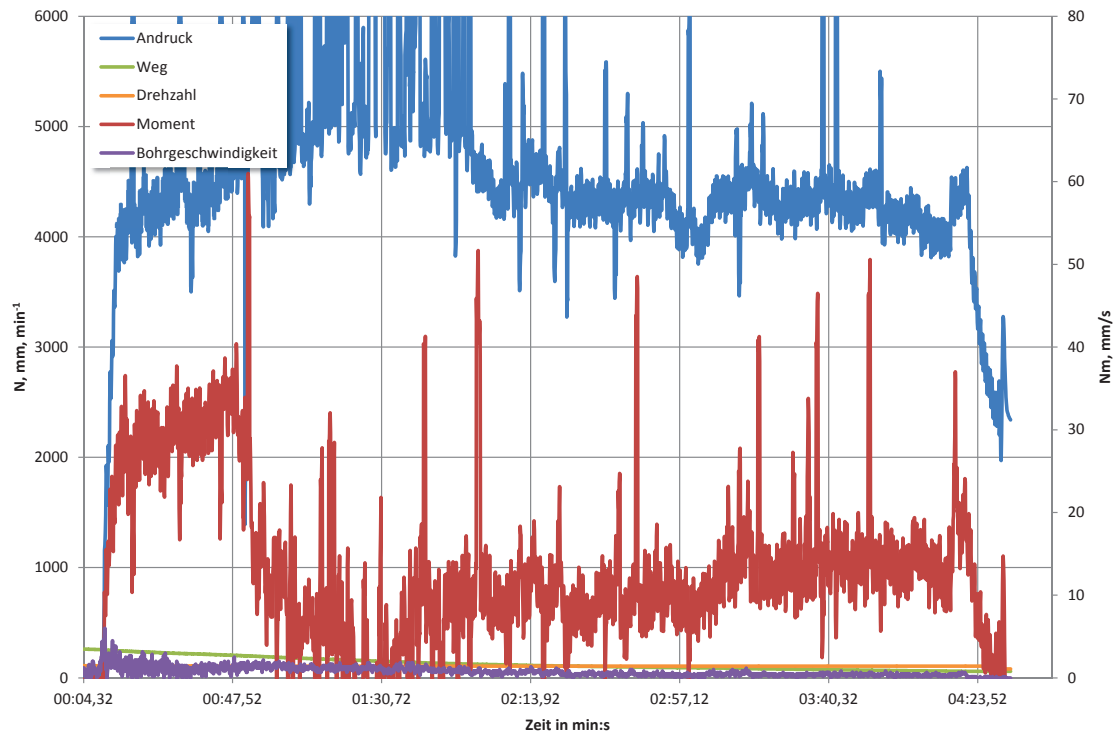


Abb. A.42: Bohrversuch 2011-03-28-26 in Lausitzer Granit

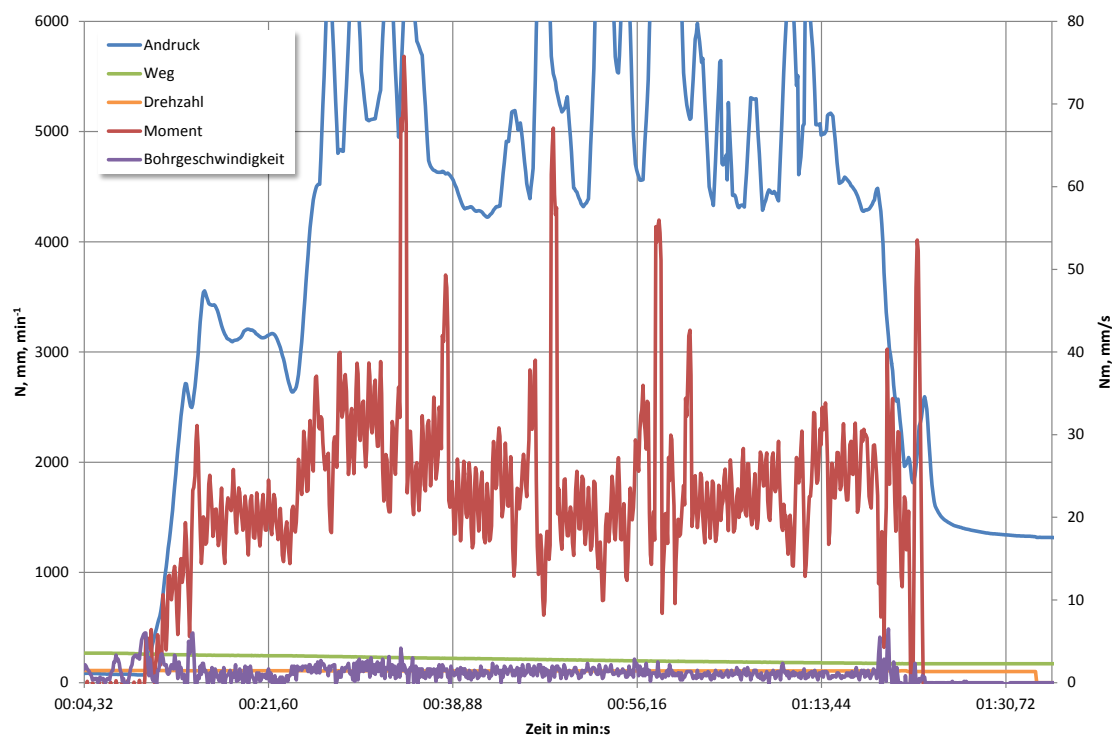


Abb. A.43: Bohrversuch 2011-03-28-27 in Lausitzer Granit

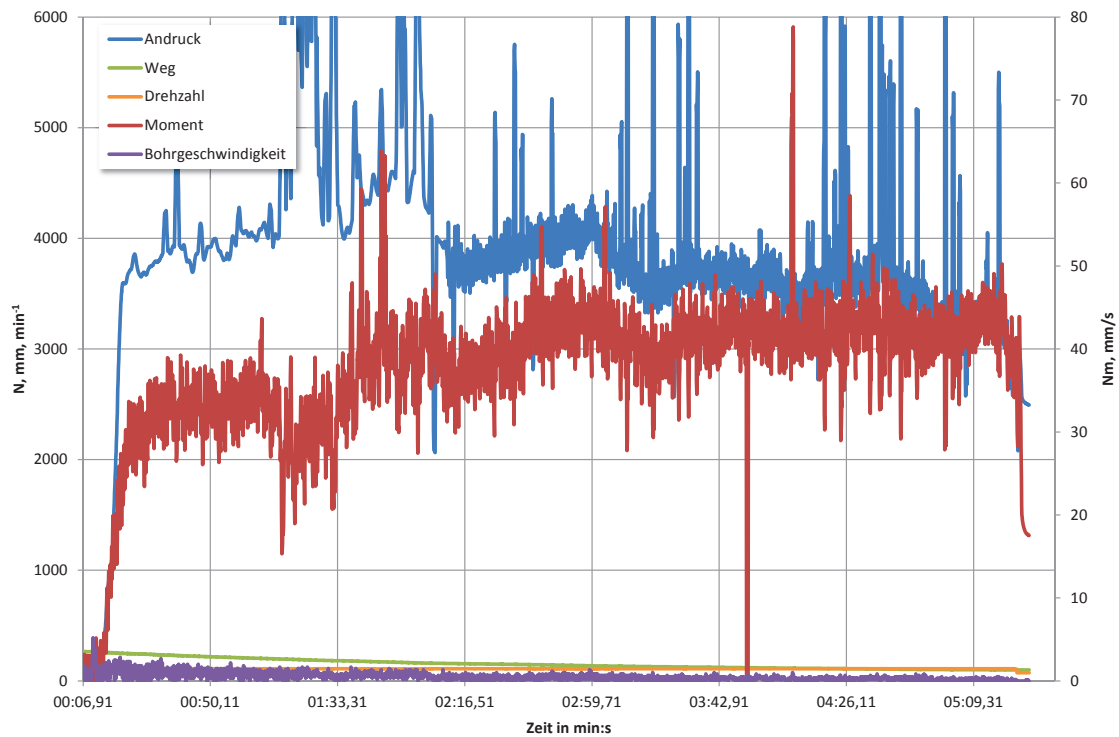


Abb. A.44: Bohrversuch 2011-03-28-28 in Lausitzer Granit

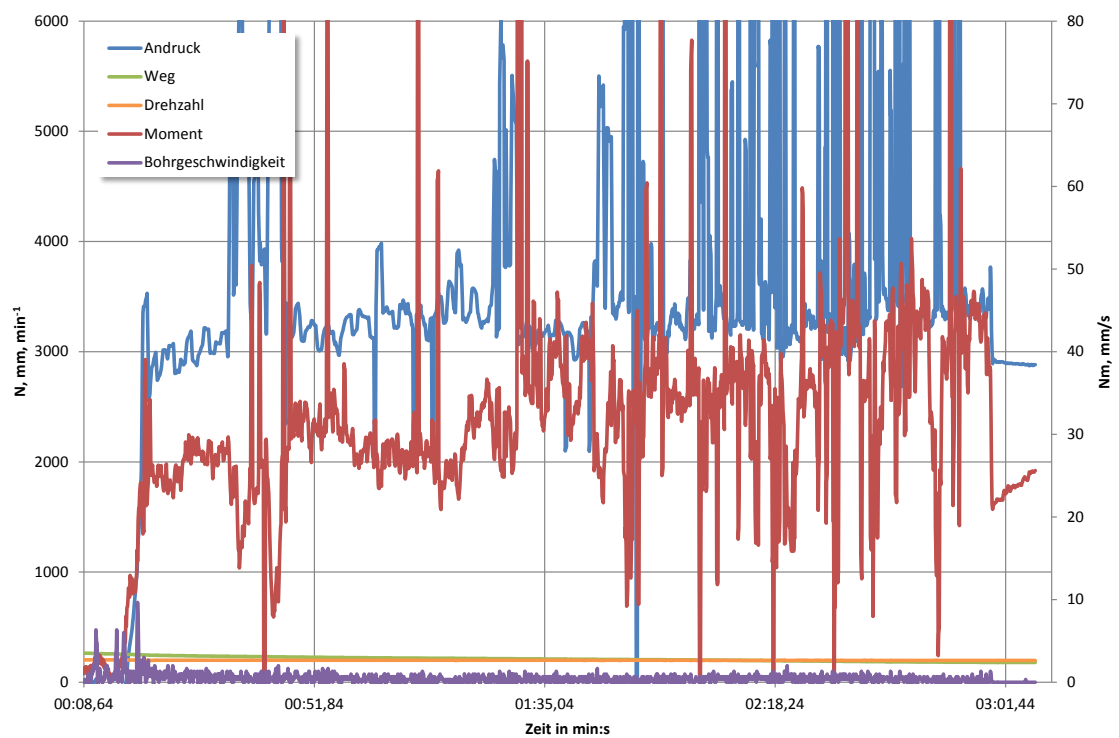


Abb. A.45: Bohrversuch 2011-03-29-33 in Lausitzer Granit

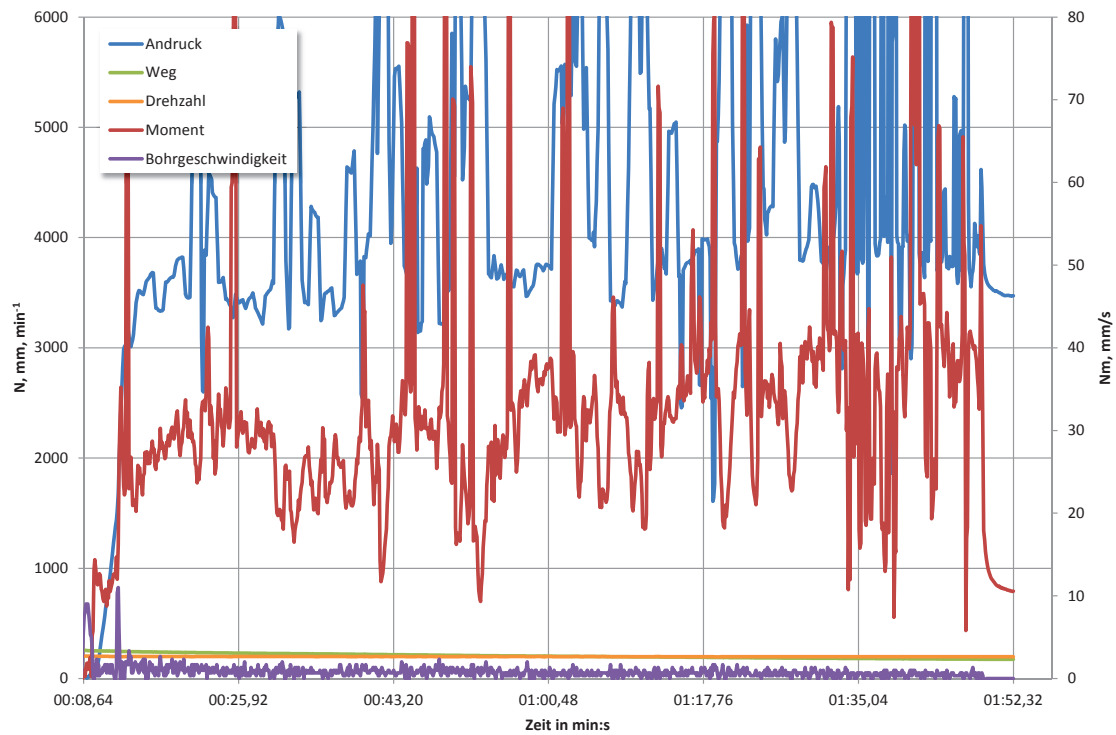


Abb. A.46: Bohrversuch 2011-03-29-34 in Lausitzer Granit

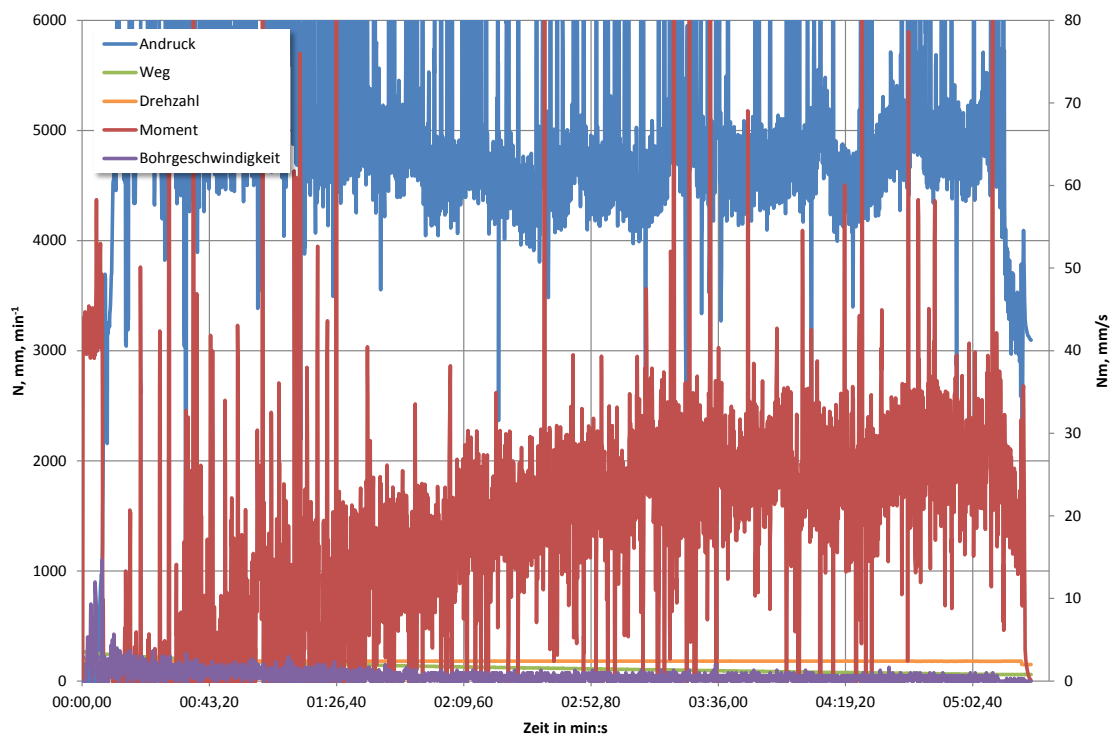


Abb. A.47: Bohrversuch 2011-03-30-35 in Lausitzer Granit

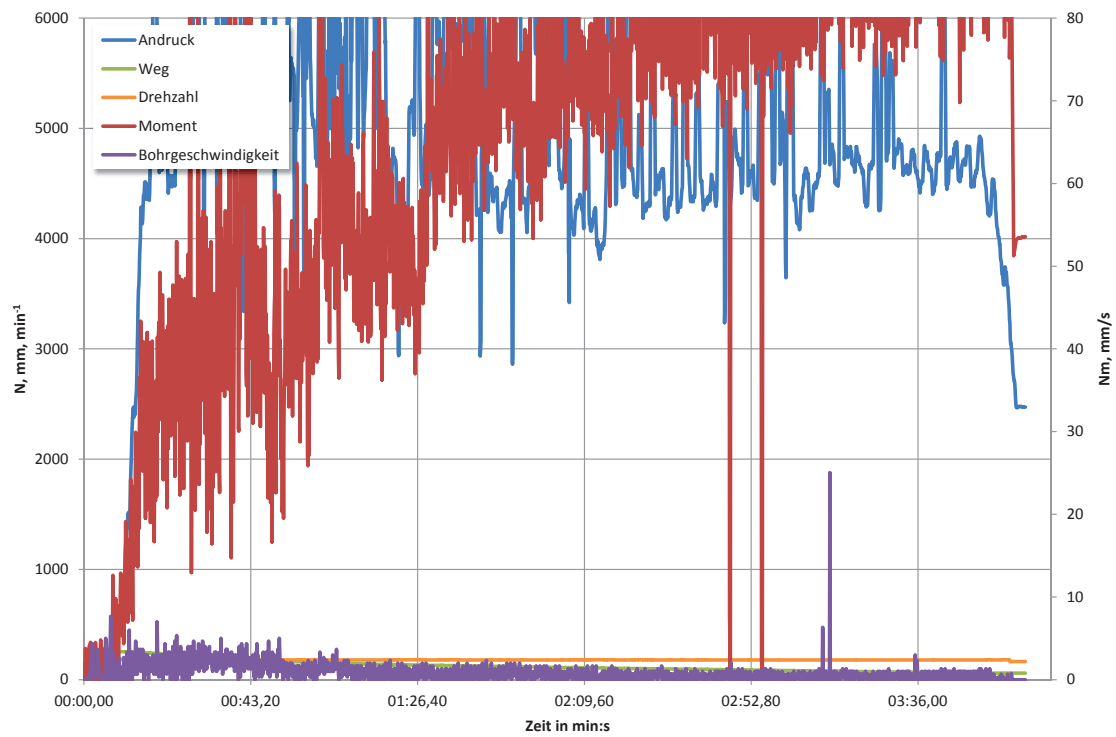


Abb. A.48: Bohrversuch 2011-03-30-36 in Lausitzer Granit

B Spangebendes Bohren mit neuen Schneidmaterialien

B.1 Bohrverlaufdiagramm Freiburger Gneis

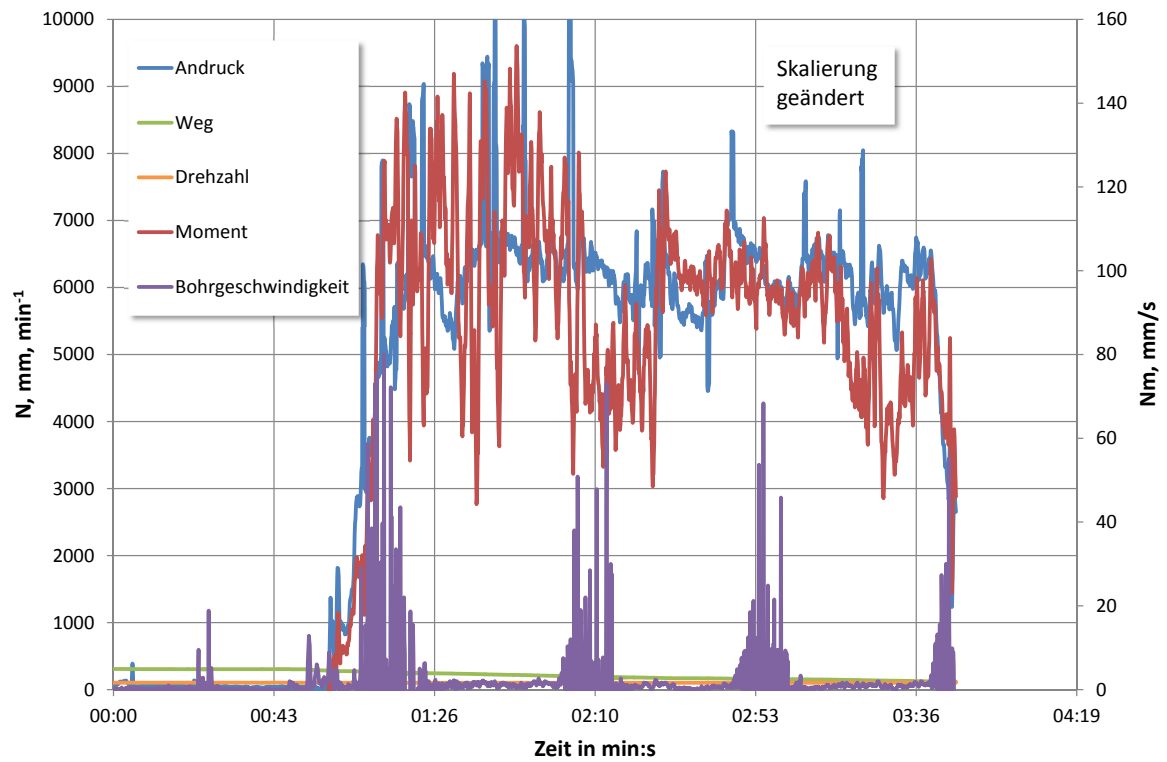


Abb. B.1: Bohrversuch 2011-08-24-01 in Freiburger Gneis

B.2 Bohrverlaufsdigramme Postaer Sandstein

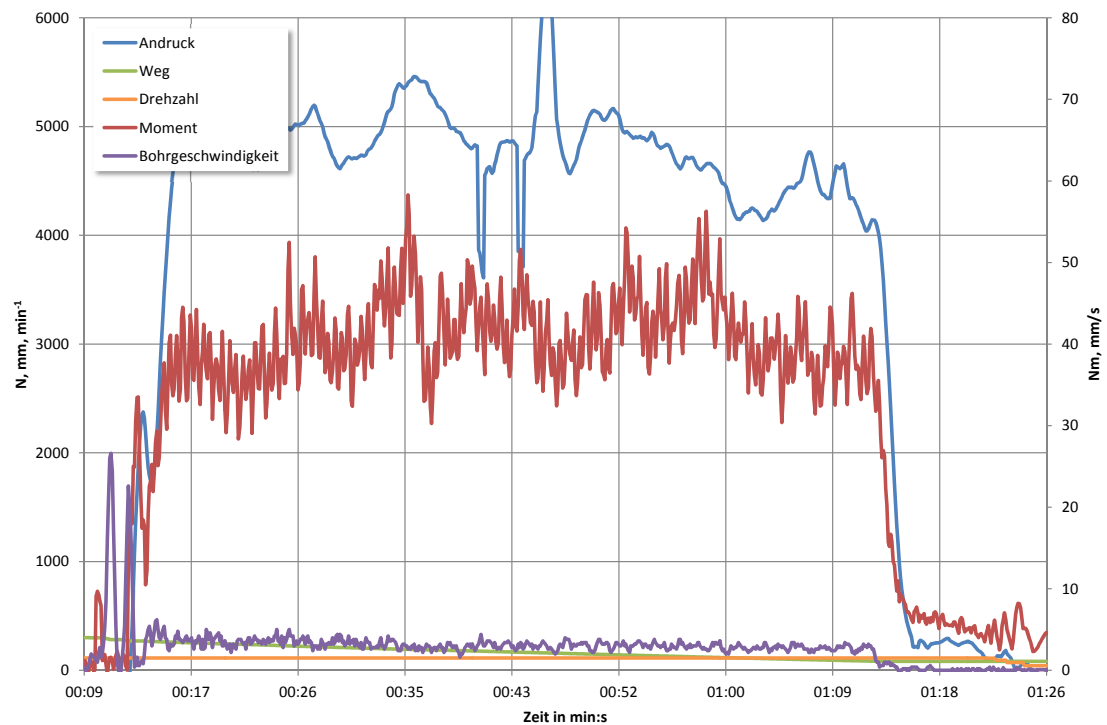


Abb. B.2: Bohrversuch 2011-08-24-02 in Postaer Sandstein

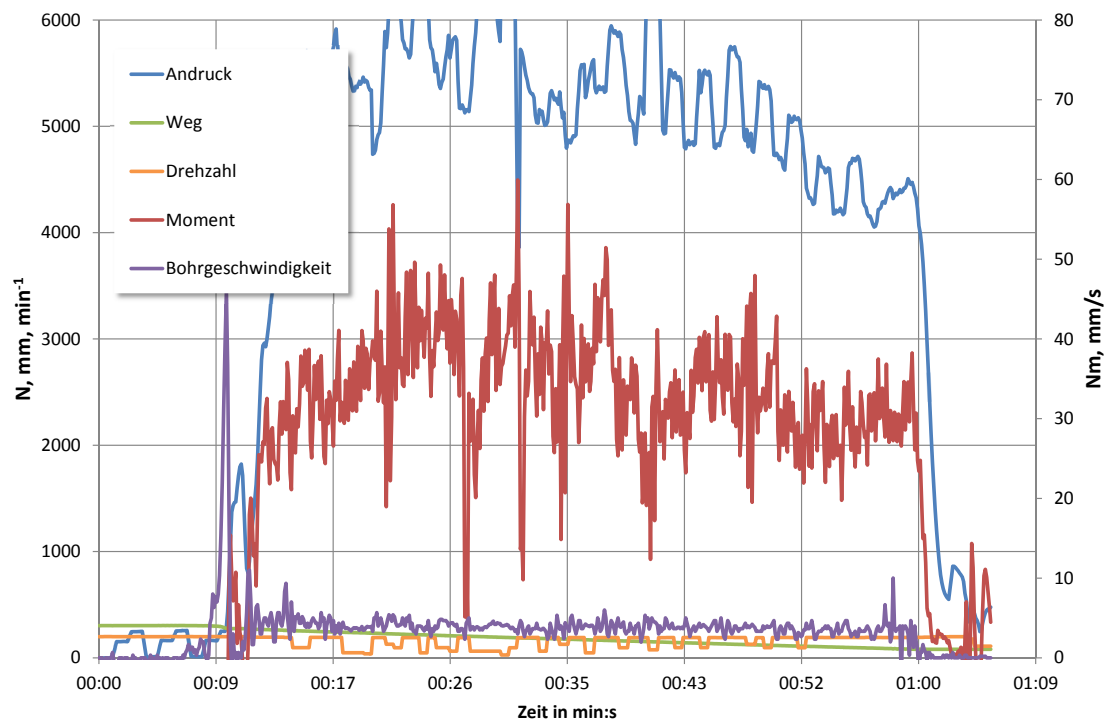


Abb. B.3: Bohrversuch 2011-08-25-03 in Postaer Sandstein

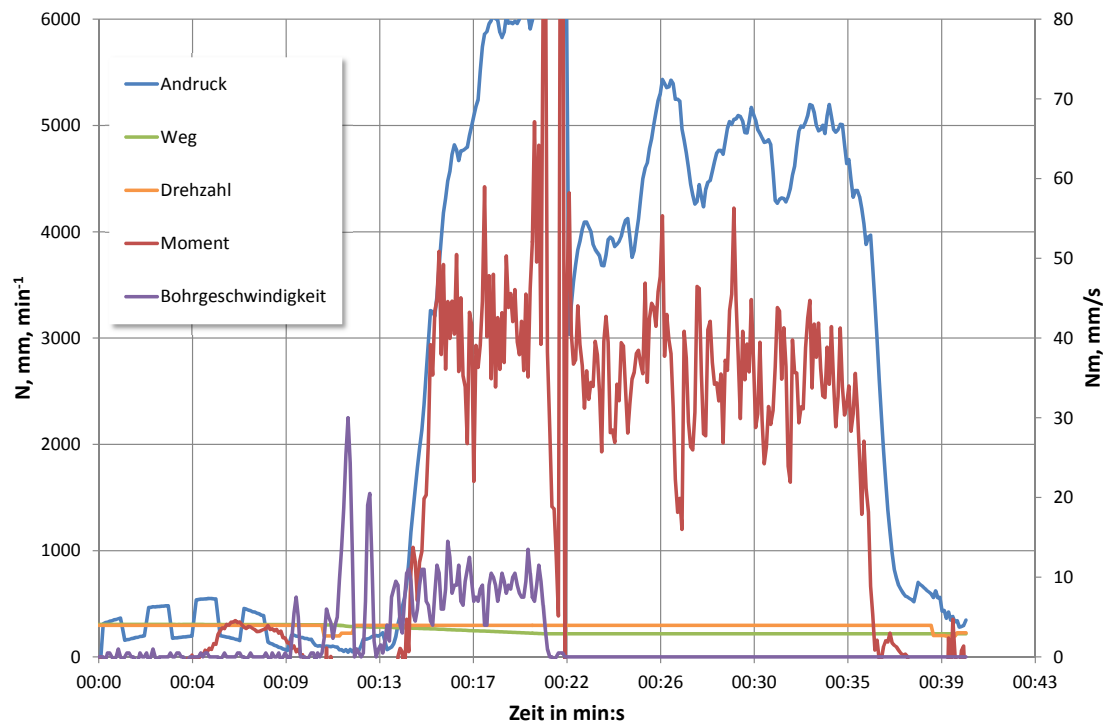


Abb. B.4: Bohrversuch 2011-08-25-05 in Postaer Sandstein

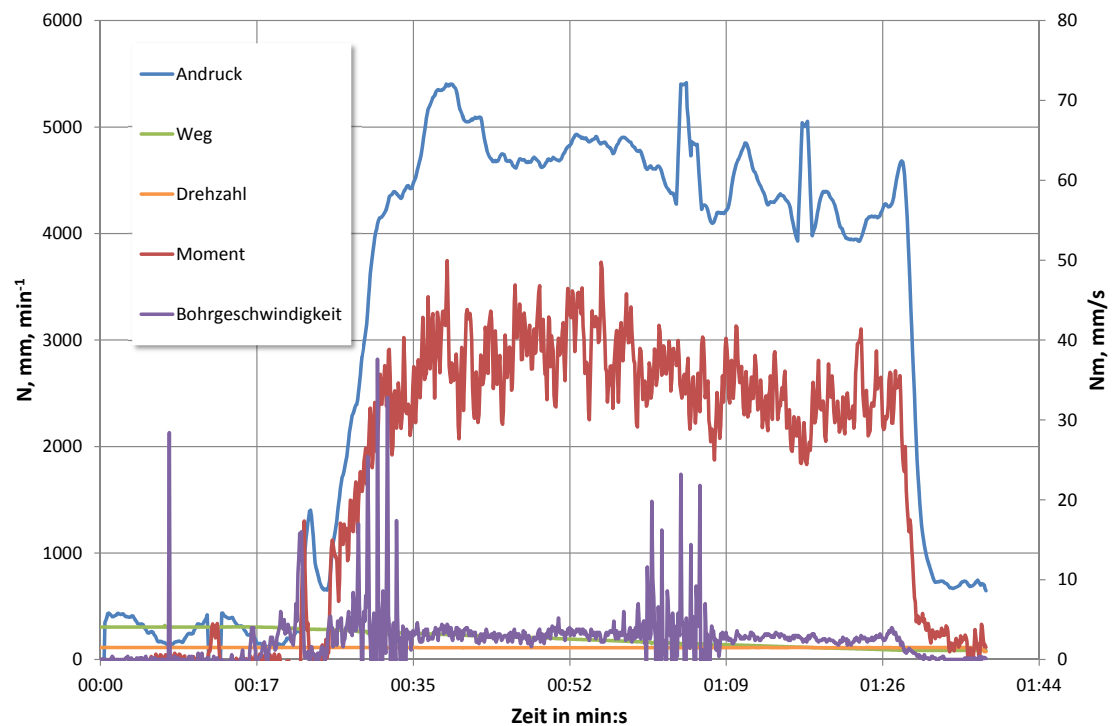


Abb. B.5: Bohrversuch 2012-05-09-01 in Postaer Sandstein

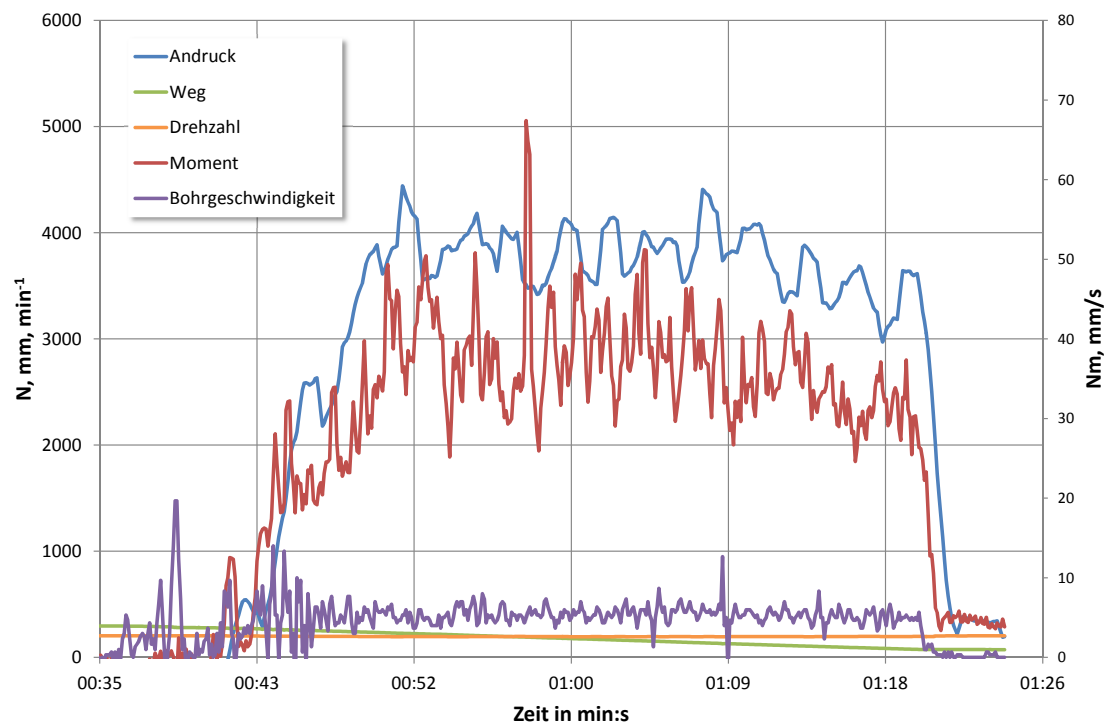


Abb. B.6: Bohrversuch 2012-05-09-02 in Postaer Sandstein

C Berechnungen zu den spanenden Versuchen

C.1 Kompensation der Halbbrückenschaltungseffekte

Durch die Anordnung der Dehnmessstreifen zur Aufnahme von Drehmoment und Andruckkraft an der Messwelle sowie deren Verschaltung in einer Halbbrückenschaltung (WHEATSTONE-Brücke), kommt es zu einer Beeinflussung des Drehmomentes (M) durch die Andruckkraft (F_A). Um diesem Effekt entgegen zu wirken, kann eine Kompensation mittels der Querdehnzahl (ν) des Messwellenwerkstoffes erfolgen, Formel C.1.

$$|M| = M - (\nu \cdot F_A) \quad (\text{C.1})$$

Weitere Faktoren zur Umrechnung der erhaltenen Voltsignale in das eigentliche Nutzgröße, z. B. Umrechnung von N in V , sind mit zu berücksichtigen.

C.2 Bestimmung der Flächenpressungen an den Schneiden

Zum Erhalt eines aussagekräftigen Wertes für die aufzubringenden Flächenpressungen an den Schneiden, muss jeweils die projizierte Fläche in Schnitt- und Vorschubrichtung nach Abb. C.1 betrachtet werden.

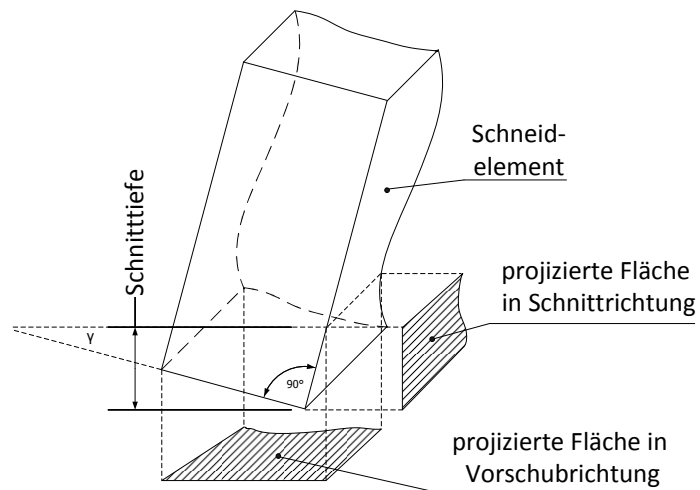


Abb. C.1: Ermittlung der Flächenpressungen an einem Schneidelement

Abhängig von Schnitttiefe, Neigungswinkel der Probe und Probendicke berechnet sich die belastete Fläche in Vorschubrichtung unterschiedlich.

Die Flächenpressungen in Vorschubrichtung ergeben sich zu:

Fall 1:

$$p_{proj,v} = \frac{F_A}{b \cdot h \cdot \left(\frac{1}{\tan \gamma} + \tan \gamma \right)} \quad (C.2)$$

Fall 2:

$$p_{proj,v} = \frac{F_A}{b \cdot ((\cos \gamma \cdot b_t) + (\tan \gamma \cdot h))} \quad (C.3)$$

Dabei sind:

$p_{proj,v}$	Flächenpressung in Vorschubrichtung in N/mm^2
F_A	Andruckkraft in N
b	Schneidenbreite mm
h	Schnitttiefe in mm
b_t	Schneidendicke in mm
γ	Freiwinkel der Schneiden in $^\circ$

Die Flächenpressungen in Schnittrichtung ergeben sich zu:

$$p_{proj,s} = \frac{F_S - F_R}{t \cdot b} \quad (\text{C.4})$$

Dabei sind:

$p_{proj,s}$	Flächenpressung in Schnittrichtung in N/mm^2
F_S	Schnittkraft in N
b	Schneidenbreite mm
h	Schnitttiefe in mm

C.3 Schnittiefen und spezifische Energien

C.3.1 Schnitttiefe

Die Schnittiefen können nach folgendem einfachen Zusammenhang berechnet werden.

$$h = \frac{v_B}{n} \quad (\text{C.5})$$

Dabei gilt:

h	Schnitttiefe
v_B	Bohrgeschwindigkeit m/s
n	Drehzahl in s^{-1}

C.3.2 Spezifische Energie

Eine Berechnung der Energie gründet sich auf Gleichung (3.7) auf Seite 59. Durch Einsetzen der Kräfte für den Vorschub und des Momentes sowie des gelösten Volumenstromes gestaltet sich die Formel wie folgend dargestellt.

$$e_{spez} = \frac{(F_A \cdot v_B + M \cdot \omega)}{\dot{V}} \quad (\text{C.6})$$

Dabei gilt:

e_{spez}	spezifische Energie in N/m^2
F_A	Andruckkraft in N
v_B	Bohrgeschwindigkeit m/s
ω	Winkelgeschwindigkeit in s^{-1}
\dot{V}	Volumenstrom an gelöstem Gestein in m^3/s

D Beigelegter Datenträger

Auf dem beigelegten Datenträger finden sich Rohdaten, Diagramme, Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und eine PDF-Datei dieser Arbeit. Alle auf dieser CD gespeicherten Daten sind urheberrechtlich geschützt. Jegliche Vervielfältigung, Veröffentlichung oder Weitergabe an Dritte bedarf der ausdrücklichen Erlaubnis des Urhebers.

Die Ordnerstruktur gestaltet sich wie folgt:

```
PDF Datei der Dissertation
├── Spanende Versuche
│   ├── Rohdaten
│   ├── Ausgewertete Daten
│   ├── Bohrverlaufsdiagramme
│   └── Hochgeschwindigkeitsaufnahmen
├── Schlagende Versuche
│   ├── Rohdaten
│   │   ├── Rhyolith Flachmeißel
│   │   ├── Rhyolith Insertmeißel
│   │   ├── Quarzit Insertmeißel
│   │   └── Gabbro Insertmeißel
│   └── Hochgeschwindigkeitsaufnahmen
```